

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMILIN JOMA DA SILVA

**ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E ÓPTICAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* MODIFICADA TERMICAMENTE**

CURITIBA

2014

EMILIN JOMA DA SILVA

**ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E ÓPTICAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* MODIFICADA TERMICAMENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Estágio Profissionalizante em Engenharia Industrial Madeireira, Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Venson

Coorientadores:

Prof. Dr. Johannes Welling

CURITIBA

2014

AGRADECIMENTOS

DANKSAGUNGEN

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda de pessoas que entusiasticamente acreditam no uso da madeira como matéria prima de ampla cadeia produtiva.

Die Durchführung dieser Arbeit war nur möglich aufgrund der Hilfe von Menschen die enthusiastisch für die Nutzung von Holz, als einen Rohstoff in einer vielfältigen Produktionskette eintreten.

Agradeço aos meus pais Álvaro Luiz da Silva e Denise Vieira da Silva por sempre me incentivarem a estudar e por mais que eu nunca tenha sido a melhor da turma, ofereceram-me oportunidades que só nós sabemos como foram custosas. Meu eterno e especial muito obrigada a vocês.

As instituições Universidade Federal do Paraná e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bem como os docentes Prof. Dr. Umberto Klock, Prof. Dr. Alan Sulato de Andrade e Prof. Dr. Ivan Venson, que em 2012 me concederam o privilégio de cursar um ano de minha graduação na Universidade de Hamburg, Alemanha, e permitiram o desenvolvimento desta pesquisa.

A Universidade de Hamburg que junto com o grupo de docentes possibilitou a realização deste trabalho de conclusão de curso em especial ao senhor Prof. Dr. Jörg Fromm por me apresentar ao Dr. Johannes Welling. As técnicas dos laboratórios de: física da madeira Frau Birgit Butenschön e Frau Dörte Bielenberg; biologia da madeira Frau Marie Lenz; carpintaria Frau Stefanie Warsow que me auxiliaram na preparação dos corpos de provas, nos ensaios mecânicos, físicos e óptico, sempre falando pausadamente para que eu pudesse compreender e aprender ainda mais o idioma alemão, que hoje é a minha segunda língua.

Ich möchte gern der Universität Hamburg danken, die durch die Zusammenarbeit der Professoren das Zustandekommen dieser Abschlussarbeit

ermöglichte, insbesondere danke Herr Prof. Dr. Jörg Fromm für die Vorstellung von Herr Dr. Johannes Welling. Ausserdem danke ich den technischen Mitarbeitern der Labor: der Holzphysik, Frau Birgit Butenschön und Frau Dörte Bielenberg, in der Holzbiologie Frau Marie Lenz, in der Tischlerin Frau Stefanie Warsow, die mir mit der Vorbereitung der Proben, für die mechanischen, physikalischen und optischen Tests geholfen haben. Vielen Dank für ihre Geduld und dafür, dass sie mit mir immer langsam sprachen, weshalb ich besser verstehen und noch mehr Deutsch lernen konnte, so dass Deutsch heute meine Zweit spache geworden ist.

A todos os colegas de curso, madeireiros e florestais, discentes e docentes pelo companheirismo, atenção, suporte emocional e importante fonte de troca de informações que auxiliam positivamente a minha evolução dentro da Escola.

Ao meu orientador, amigo e eterno tutor Prof. Dr. Ivan Venson, por estar sempre de portas e ouvidos abertos aos meus questionamentos e pela disposição em orientar em mais esta monografia, mesmo que inicialmente à distância. Desculpe-me por não ter atendido a todas as nossas expectativas, mas agradeço pelo meu futuro sucesso como engenheira industrial madeireira, que terá muito dos seus conselhos, modo de pensamento, técnicas de mediação e criatividade. Tenho certeza que você influencia positivamente uma geração de novos engenheiros na área de Ciência Florestal e da Madeira.

Ao meu coorientador Dr. Johannes Welling, por disponibilizar seu tempo, material, laboratórios, técnicos e esforçar-se a entender meu alemão precário. Obrigada por acreditar na minha competência e pelo apoio que me deste durante a excussão dos experimentos.

Meinem Zweibetreuer Dr. Johannes Welling, dafür, dass er seine Zeit, Material, Labor und Techniken zu Verfügung gestellt hat, und für die Mühen, mein prekäres Deutsch zu verstehen. Vielen Dank für Ihren Glauben in meine Fähigkeiten und für die Unterstützung die Sie mir während der Ausführung der Versuchen gegeben haben.

Ao doutorando e grande entusiasta da cooperação internacional entre Brasil e Alemanha Goran Schmidt, por ter me auxiliado em todos os passos da execução dos tratamentos térmicos e me apresentado um novo mundo dentro

da pesquisa científica, ainda por ter me incentivado a prosseguir com meus estudos e alcançar o mestrado.

An den Doktoranden und grossen Enthusiasten der internationalen Zusammenarbeit zwischen Brasilien und Deutschland Goran Schmidt, für die Hilfe bei den einzelnen Schritten des Hitzebehandlungsprozess, sowohl für die Vorstellung einer neuen Welt in der wissenschaftlichen Forschung, als auch für den Anreiz, mein Studium zur Erreichung der Masters fortzusetzen.

Ao doutorando Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori por me ajudar com a execução, entendimento e interpretação estatística de vários dos experimentos que apresento aqui, além das incríveis bibliografias que me disponibilizou e que enriqueceram a composição textual deste trabalho de conclusão de curso.

Aos professores Dr. Ricardo Jorge Klitzke e Dr. João Carlos Moreschi examinadores dos EVINCIs que apresentei durante a graduação, em especial por despertarem em mim o interesse sobre suas áreas de atuação dentro da Universidade e por me explicarem com críticas construtivas sobre a melhor condução e formulação de um projeto de pesquisa.

RESUMO

A madeira de *Eucalyptus grandis* é utilizada no Brasil em larga escala na fabricação de celulose e papel, bem como biomassa. Esta espécie é caracterizada por crescimento rápido, alta adaptabilidade e boas propriedades de fibra. Culturalmente, o Brasil parece ter receio de utilizar a madeira como material construtivo e os motivos apresentados vão desde a baixa durabilidade bem como problemas causados por sua característica anisotrópica. Tratamentos que submetem a madeira a altas temperaturas podem modificar algumas propriedades e influenciar positivamente o comportamento higroscópico melhorando a estabilidade dimensional e aumentando a durabilidade natural da madeira. O calor altera ainda propriedades de textura, cor e cheiro da madeira. Objetivando analisar os efeitos causados em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* exposta a altas temperaturas, foram realizados dois tratamentos térmicos em mufla laboratorial sem circulação de ar e com vapor d'água (H1: Temp: 150°C, 4h e H2: Temp: 200°C, 3 h) havendo um terceiro grupo amostral para controle (K). Após o tratamento térmico, seguiram-se os ensaios de propriedade(s) físicas (perda de massa, higroscopicidade e molhabilidade de superfície), mecânicas (flexão estática e dinâmica perpendicular às fibras, compressão axial paralela às fibras e dureza Brinell) e óptica (colorimetria). Foi observado que as amostras modificadas termicamente diminuíram sua capacidade higroscópica, desenvolvendo comportamento hidrófobo, observado nitidamente na medição do ângulo de contato de uma gota d'água com a superfície da madeira, sendo para as amostras tratadas (K: 53,50°; H1: 64,17°; H2: 69,29°) mais próximos ao ângulo reto, indicando que a modificação provocou repelência à água. Houve decréscimo do módulo de ruptura da madeira modificada termicamente em comparação ao grupo de controle para flexão estática (K: 100N/mm²; H1: 78N/mm²; H2: 74N/mm²) e compressão axial (K: 62,70N/mm²; H1: 58,18N/mm²; H2: 53,69N/mm²) assim como para o coeficiente de resiliência calculado a partir do ensaio de flexão dinâmica (K: 0,54; H1: 0,21; H2: 0,20). Não houve alterações estatisticamente significantes para a dureza Brinell (K: 20,51N/mm²; H1: 17,72N/mm²; H2: 18,97N/mm²). A madeira se tornou friável quando submetida à alta temperatura hipoteticamente devido à perda de massa das hemiceluloses gerando ligações menos flexíveis na composição da madeira. A diferença total de cor para H1 foi de ΔE : 10,07 e para H2 foi de ΔE : 27,64 quando as amostras foram comparadas com o controle, sendo observado que o escurecimento foi proporcional ao aumento da temperatura. O tratamento térmico melhorou a textura ao toque apresentando-se mais lisa. Madeira modificada termicamente é empregada para fins de isolamento térmico/acústico e decorativos, pisos, decks e saunas na Europa, mas é pouco difundida no Brasil. Os efeitos provocados pelo tratamento térmico na madeira causam modificações na estrutura de suas substâncias, reduzindo a resistência mecânica da madeira, bem como a sua higroscopicidade, melhorando a estabilidade dimensional. A madeira se torna mais escura de acordo com o aumento da temperatura. Este material possui interessante apelo estético de textura e cor e não será no fim do seu ciclo de vida um produto tóxico, podendo ser utilizado internamente e externamente substituindo madeira tratada quimicamente.

Palavras chaves: modificação térmica, *Eucalyptus grandis*, higroscopicidade, propriedades mecânicas da madeira, colorimetria.

ABSTRACT

Eucalyptus grandis wood is usually used in pulp and paper production, as well as biomass. The specie is well known as a fast growing tree, with high adaptability which has also good fiber properties. Culturally, Brazil seems to be afraid to use wood as a building material and the reasons given range from low durability to problems caused by its anisotropic characteristic. Treatments that submit wood to high temperatures can modify some properties and influence positively the hygroscopic behavior, improving dimensional stability and the natural durability. The heat treatment changes as well texture, color and smell of wood. With aim to analyze the caused effects in some wood properties of *Eucalyptus grandis* exposed to high temperatures, two heat treatments in laboratory muffle oven without air circulation and with water vapor (H1: Temp: 150°C, 4h and H2: Temp: 200°C, 3h) were realized. A third group served as control sample (K). After the heat treatment, analysis of physical properties (mass loss, hygroscopicity and wettability), mechanicals properties (static bending, dynamic bending, axial compression and Brinell hardness) as well as optical properties (color change), were made. It was observed that heat modified samples had their hygroscopic capacity lower, creating a hydrophobic behavior, well noted through the contact angle measurement of a water drop with the wood surface (K: 53,50°; H1: 64,17°; H2: 69,29°), which for the treated samples showed to be near to the right angle, indicating that modification developed water repellency. For modified wood in comparison with the control group, a lower modulus of rupture for static bending (K: 100N/mm²; H1: 78N/mm²; H2: 74N/mm²) and axial compression (K: 62,70N/mm²; H1: 58,18N/mm²; H2: 53,69N/mm²) was found, as well as for the resilience coefficient obtained through dynamic bending (K: 0,54; H1: 0,21; H2: 0,20). For Brinell hardness statistically significant alterations were not obtained (K: 20,51N/mm²; H1: 17,72N/mm²; H2: 18,97N/mm²). Treated wood was transformed in a friable material, provided through the hemicelluloses mass loss, developing inflexible bonds into wood composition. A total color difference for H1 was ΔE : 10,07 and for H2 was ΔE : 27,64 when the samples were compared with the control group, and thereby was observed that the darkening was proportional with rise in temperature. The heat treatment improved a "soft touch", presenting smooth surface. Modified wood is used in many constructive uses for purpose of thermal/acoustic insulation and decoration in Europe, but is still an unexplored market in Brazil. The effects produced through wood heat treatment, cause modifications into its structure, reducing the mechanical resistance, as well its hygroscopicity, improving dimensional stability. The wood turns darker with rise in temperature. This material has an interesting visual appearance of texture and color, similar to noble woods, which will not be at an environmental problem at their life cycle's end, with possible internal and external uses, substituting wood treated with chemicals.

Keywords: heat treatment, *Eucalyptus grandis*, mechanical properties of wood, hygroscopic, color change.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CORPOS DE PROVA DIVIDIDOS EM K-CONTROLE, H1-TRATAMENTO1 E H2-TRATAMENTO 2.....	23
FIGURA 2 – FORNO TIPO MUFLA HERAEUS INSTRUMENTS	24
FIGURA 3 - CORPO DE PROVA SENDO EMBALADO EM FOLHA DE ALUMÍNIO	24
FIGURA 4 - CORPOS DE PROVA EMBALADOS EM FOLHA DE ALUMÍNIO E EMPILHADOS DENTRO DO FORNO COM AUXÍLIO DE SEPARADORES ...	24
FIGURA 5 - PINO SENSOR INSERIDO EM CORPO DE PROVA LOCALIZADO MAIS AO CENTRO DA PILHA	24
FIGURA 6 - CURVA DE TEMPERATURA PARA O TRATAMENTO TÉRMICO H1-150°C	25
FIGURA 7 - CURVA DE TEMPERATURA PARA O TRATAMENTO TÉRMICO H2-200°C	26
FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVAS PARA OS ENSAIOS SUBSEQUENTES	27
FIGURA 9 - DIMENSÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE HIGROSCOPICIDADE 1) SEÇÃO TRANSVERSAL 2) RETÂNGULOS 3) FLAKES	31
FIGURA 10 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE COM OS CORPOS DE PROVA DISPOSTOS EM RECIPIENTES DE ALUMÍNIO	32
FIGURA 11 - GOTA DE ÁGUA MOMENTOS ANTES DO CONTATO COM A SUPERFÍCIE DA MADEIRA.....	33
FIGURA 12 - CORPO DE PROVA QUE TEVE SEU LIMITE DE RUPTURA EXTRAPOLADO, APÓS O RECUO DA FORÇA APLICADA PELA MÁQUINA DE ENSAIO.....	35
FIGURA 13 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	36
FIGURA 14 - MÁQUINA DE ENSAIO CONFIGURADA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL COM GARRAS MECÂNICAS NO C.P.....	37

FIGURA 15 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA O TESTE DE DUREZA PELO MÉTODO DE INSERÇÃO DE ESFERA.....	38
FIGURA 16 - COLORÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DE MEDIDA PADRÃO DE COR CIE DE ACORDO COM OS EIXOS L^* , a^* E b^* ..	39
FIGURA 17 - EIXOS COORDENADOS L^* , a^* E b^* DA POSIÇÃO DAS CORES DETECTADAS PELO COLORÍMETRO	40
FIGURA 18 - ÂNGULO DE TINTA H^* EM VOLTA DO EIXO L^*	41
FIGURA 19 - CURVA DE DESORÇÃO E SORÇÃO PARA MADEIRA MACIÇA PARA OS GRUPOS K, H1 E H2 À 20°C.....	45
FIGURA 20 - CURVA DE DESORÇÃO E SORÇÃO PARA FLAKES MADEIRA PARA OS GRUPOS K, H1 E H2 À 20°C.....	45
FIGURA 21 - INTERAÇÃO DA GOTA COM A SUPERFÍCIE DA MADEIRA DO GRUPO K, H1 E H2 PARA $T=5000\mu s$	48
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA 1) CONTROLE 2) H1 3) H2.....	51
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA POR TRATAMENTO 1) CONTROLE 2) H1 3) H2.....	54
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA DUREZA BRINELL POR GRUPO.....	55
FIGURA 25 - AMOSTRAS DO CONTROLE, TRATAMENTO H1 E TRATAMENTO H2.....	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA MADEIRA EM DIVERSAS PROPRIEDADES.....	18
TABELA 2 - PARÂMETROS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, T.U.: TEOR DE UMIDADE, t.(H): TEMPO EM HORAS	27
TABELA 3 - ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, NORMAS UTILIZADAS, DIMENSÃO E NÚMERO DE C.P. (CORPOS DE PROVA) POR TRATAMENTO.....	34
TABELA 4 - MASSA ESPECÍFICA BÁSICA PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	42
TABELA 5 - MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO.....	43
TABELA 6 - ÂNGULO DE CONTATO OBTIDO NO ENSAIO DE MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	47
TABELA 7 - PERDA DE MASSA OBTIDO PELA EQUAÇÃO 1 POR GRUPO DE AMOSTRA E RESUMO ESTATÍSTICO	49
TABELA 8 - FORÇA MÁXIMA ($F_{m\acute{a}x}$), MÓDULO DE ELASTICIDADE (EB) E MÓDULO DE RUPTURA (β_B) OBTIDO NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	50
TABELA 9 - COEFICIENTE DE RESILIÊNCIA OBTIDO NOS ENSAIOS DE FLEXÃO DINÂMICA POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO.....	52
TABELA 10 – FORÇA MÁXIMA ($F_{m\acute{a}x}$), MÓDULO DE ELASTICIDADE (ED) E MÓDULO DE RUPTURA (σ_D) OBTIDO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO.....	53
TABELA 11 - DUREZA BRINELL OBTIDO NO ENSAIO DE DURAZE BRINELL POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO.....	55
TABELA 12 - VARIÁVEL L^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	57

TABELA 13 - VARIÁVEL a^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	58
TABELA 14 - VARIÁVEL b^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	58
TABELA 15 - VARIÁVEL h^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	59
TABELA 16 - VARIÁVEL C^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO	60
TABELA 17 - MÉDIA DOS VALORES DE L^* , A^* , B^* , C^* E H^* OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO PARA TRÊS SUPERFÍCIES COM TRATAMENTO DISTINTO POR GRUPO DE AMOSTRAS (1: SUPERFÍCIE BRUTA, 2: SUPERFÍCIE LIXADA, 3: SUPERFÍCIE INTERNA).....	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 MATERIAL	23
4.2 TRATAMENTO TÉRMICO	24
4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	27
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
4.5 PROPRIEDADES FÍSICAS	29
4.5.1 MASSA ESPECÍFICA (ME)	29
4.5.2 COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO	30
4.5.3 MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE	32
4.5.4 PERDA DE MASSA	33
4.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS	34
4.6.1 FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS	34
4.6.2 FLEXÃO DINÂMICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS	36
4.6.3 COMPRESSÃO AXIAL PARALELA ÀS FIBRAS	37
4.6.4 DUREZA BRINELL	38
4.7 PROPRIEDADE ÓPTICA	39
4.7.1 COLORIMETRIA	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42

5.1 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.....	42
5.1.1 MASSA ESPECÍFICA.....	42
5.1.2 COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO.....	44
5.1.3 MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE	46
5.1.4 PERDA DE MASSA.....	48
5.2 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	49
5.2.1 FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR AS FIBRAS.....	49
5.2.2 FLEXÃO DINÂMICA PERPENDICULAR AS FIBRAS.....	51
5.2.3 COMPRESSÃO AXIAL PARALELA AS FIBRAS	53
5.2.4 DUREZA BRINELL.....	54
5.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DA MADEIRA.....	56
5.3.1 COLORIMETRIA	56
6 CONCLUSÃO.....	62
7 REFERÊNCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A baixa durabilidade natural da madeira sempre foi uma preocupação desde o início de sua utilização. Métodos para preservação de madeira a partir do aquecimento de suas camadas externas aumentam a resistência à biodeterioração e não utilizam produtos tóxicos que são no fim do seu ciclo de vida, um problema ambiental. Altas temperaturas provocam a condensação de constituintes da madeira, melhorando seu comportamento higroscópico sua estabilidade dimensional. Além disto, tratamentos térmicos alteram a coloração da madeira e conferem a espécies de cor clara, uma característica especial. A modificação térmica da madeira possibilita que espécies madeireiras de pouco valor e baixa durabilidade natural possam ser empregadas em produtos de maior valor agregado.

Arquitetos, engenheiros florestais, engenheiros industriais madeireiros, estudantes, professores e empresários do setor de construção civil discutem a cultura brasileira da aversão a construções com madeira. A queixa gira em torno da sua fácil biodegradação e seu poder calorífico que poderia ser facilmente incinerado, quando comparado a outros materiais.

A ABRAF (2013) relatou que 76,6% da área de plantios florestais no Brasil, são compostos por *Eucalyptus spp.* A IBA (Indústria Brasileira de Árvores, 2013) destacou os segmentos que utilizam o *Eucalyptus* como matéria prima, como a indústria de celulose e papel (56.628.357 m³), carvão (23.533.724 m³) e lenha industrial (41.832.528 m³). Para o mesmo gênero apenas 6.870.498 m³ (0,49% da madeira de eucalipto disponível) são utilizados como serrados e outros produtos sólidos. O gênero é largamente escolhido devido à sua adaptabilidade, taxa de crescimento rápida e madeira de excelente qualidade, com boas propriedades das fibras, conforme informações do Joint Genome Institute (JGI - DOE).

Recentemente cientistas comemoraram o sequenciamento do genoma do *Eucalyptus grandis*, o que representa um verdadeiro manual de instruções para compreender a base genética do seu rápido crescimento e sua inigualável

capacidade de adaptação aos mais variados ambientes frente às mudanças climáticas que tendem a aumentar a incidência de secas, geadas e grandes flutuações de temperatura.

Em visitas técnicas durante a VII Expedição Brasil Norte-Sul, supervisores de colheita florestal da produtora de celulose de eucalipto FIBRIA (Jacareí-SP) afirmaram realizar cortes rasos a partir dos 4 anos de idade do talhão. Algo similar foi relatado pela empresa DURATEX - Divisão Madeira, produtora de MDP, MDF, HDF e pisos laminados (Botucatu-SP) que realiza cortes rasos em 6-8 anos de plantio. Esses exemplos reconstituem a madeira em seus processos. Para transformação de árvores em madeira serrada, é indicado que o indivíduo tenha no mínimo 25 anos, o que acompanhado de tratamentos silviculturais específicos para esta finalidade, proporciona madeira sem muitas tensões de crescimento e maior volume por tora.

A madeira modificada termicamente é produzida industrialmente na Europa e está presente em feiras setoriais de tecnologia florestal/madeireira como a LIGNA. Entre os usos estão decks, pisos, isolamento térmico/acústico e acabamento externo de paredes (fachada) como comercializado pela empresa alemã *Hagensieker GmbH*. No Brasil, pesquisas em escala laboratorial procuram definir os parâmetros ideais de temperatura, utilização de calor seco ou úmido e espécies indicadas para o processo, mas as espécies que estão citadas na literatura são as que existem em maior disponibilidade no mercado como os gêneros *Eucalyptus*, *Pinus* e *Tectona*, porém pesquisas em escala industrial ainda são escassas.

Uma vez que o Brasil domina a genética desta árvore, seria interessante dominar também o potencial de sua vasta cadeia produtiva. Identificar as alterações na madeira causadas pelo processo de modificação térmica como propriedade colorimétrica, mecânica e a relação água-madeira é primordial para destinar o uso adequado deste novo material. Neste sentido o objetivo deste trabalho é produzir informações para fomentar o desenvolvimento dos processos industriais para madeira modificada termicamente e viabilizar a industrialização e comercialização do produto no mercado brasileiro que já são tendência na Europa

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar efeitos causados pelo tratamento térmico na madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente de plantações florestais do Uruguai para contribuir no desenvolvimento tecnológico ampliando os usos da madeira plantada de *Eucalyptus grandis*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se atingir os objetivos específicos a madeira foi tratada termicamente sob duas condições (Temp. 150 °C por 4 h / Temp. 200 °C por 3 h) e foram cumpridas as seguintes etapas:

- Avaliar as propriedades mecânicas da madeira (flexão estática, flexão dinâmica, compressão axial, dureza brinell)
- Avaliar a relação água madeira (higroscopicidade, molhabilidade, perda de massa)
- Avaliar propriedades ópticas da madeira (colorimetria)
- Sugerir potenciais usos para madeira tratada termicamente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Madeira é um material orgânico, heterogêneo, poroso, higroscópico e anisotrópico. A madeira se comporta diferentemente nos eixos de orientação e controlar essa anisotropia é importante para o processamento e uso do material. Quando seca, a contração da madeira em uso é reduzida e as rachaduras e empenamentos são evitados, a possibilidade de ataque de fungos manchadores e apodrecedores é reduzida além do acréscimo significativo da resistência mecânica (KLITZKE).

A estrutura anatômica da madeira afeta sua resistência mecânica, aparência, interação com a água e químicos e resistência à biodegradação. Para utilizar a madeira de modo efetivo é necessário o conhecimento não apenas da quantidade das várias substâncias que a compõem, mas também como essas substâncias estão distribuídas nas paredes celulares. Muitas propriedades mecânicas da madeira como flexão, compressão e dureza dependem da densidade da madeira; pois madeiras densas são geralmente mais resistentes. A densidade da madeira é determinada em grande parte pela espessura relativa da parede celular, ou seja, pela proporção de células de paredes espessas e células de paredes delgadas presentes na conformação da madeira. (DURBAK *et al*, 1998).

Segundo DURBAK *et al*. (1998) madeira é uma complexa estrutura polimérica que consiste em lignina e carboidratos (celulose e hemiceluloses) e uma quantidade mínima de outros elementos orgânicos, químicos e minerais, que não contribuem na estrutura da madeira.

A celulose pode ser comparada a um esqueleto que estrutura a parede celular e se encontra embebida numa matriz porosa, amorfa de hemicelulose, aglutinados com lignina, considerado um polímero tridimensional muito estável (DURBAK *et al* 1998). Já a hemicelulose é uma mistura de polissacarídeos amorfos de cadeia ramificada que consiste de algumas centenas de resíduos de açúcar (DURBAK *et al*, 1998).

A lignina é um polímero orgânico insolúvel amorfo, muito difícil de isolar em estado natural. Compreende 18-30% em peso da madeira seca e está mais concentrada na lamela média e camadas da parede celular. Isso confere a madeira uma estrutura rígida nas paredes celulares e diferencia a madeira de outras plantas fibrosas. A quantidade de extrativos e cinzas varia entre as espécies madeiras (5 a 20% do peso, com a função de intermediar o metabolismo das árvores como reservas energéticas e participar do mecanismo de

defesa da árvore contra ataques de agentes biológicos. Os extrativos contribuem para muitas propriedades como cor, cheiro e resistência a biodegradação (DURBAK *et al*, 1998).

Um pequeno decréscimo no módulo de ruptura e resistência à compressão paralela às fibras foi detectado para algumas espécies após a retirada dos extrativos. As influências que eles têm na resistência mecânica da madeira são aparentemente devido à quantidade de extrativos, teor de umidade da peça e as propriedades mecânicas em consideração (USDA, 2010);

Por ser um material altamente higroscópico, a madeira se relaciona com líquidos através da sorção (adsorção e dessorção de água). O teor de umidade absorvido depende principalmente do teor de umidade relativa do ambiente e temperatura. Em madeiras recém abatidas, as paredes celulares estão saturadas e suas cavidades celulares podem estar completamente cheias de água. A umidade presente nas paredes celulares é conhecida como água higroscópica e a umidade nas cavidades celulares é chamada de água livre (capilaridade). Essa distinção é feita, pois a remoção da água livre tem poucos ou quase nenhum efeito nas propriedades da madeira, em contrapartida a remoção da água contida nas paredes celulares tem efeito pronunciado. (DURBAK *et al.*, 1998)

A relação da umidade, através da adsorção de água pela madeira é possível pela existência dos grupos hidroxílicos, presente na lignina e nos carboidratos nas regiões amorfas e através da mudança da umidade relativa do ambiente, a umidade da madeira se altera (USDA, 2010).

A contração e inchamento são reflexos da sorção de água na madeira, acompanhada por mudanças volumétricas. Em teor de umidade abaixo do PSF a adsorção da água adiciona volume à madeira e a dessorção de água subtrai volume da madeira. Essa relação pode ser complicada e desenvolver estresse e sua magnitude pode ser minimizado por secagem de madeira com parâmetros controlados e condições empiricamente estabelecidas. A anisotropia da contração e do inchamento da madeira ocorre nos sentidos tangenciais aos anéis de crescimento, radialmente ao longo dos raios dos anéis de crescimento e longitudinalmente na direção do crescimento da árvore este último sendo muito pequeno. (DURBAK *et al*, 1998).

Para os efeitos reversíveis da temperatura, USDA (2010) afirma que a resistência de madeira seca, em aproximadamente 12% de teor de umidade,

pode se alterar levemente com o aumento da temperatura de 29°C até 38°C. Os efeitos irreversíveis da temperatura estão associados com a degradação de substâncias da madeira, resultando em perda de massa e resistência. A perda depende de fatores como teor de umidade, aquecimento médio, temperatura e espécie.

Temperaturas acima de 100°C produzem na madeira o início do rompimento de cadeias químicas. Entre 100°C e 200°C há a produção de CO₂, vestígios de compostos orgânicos e vapor d'água, também citado por USDA (2010) afirmando que enquanto a madeira é aquecida, a primeira perda de peso se refere à água, seguida de processos químicos que degradam produtos e gases voláteis. Acima dos 200°C ocorrem degradação da celulose, produção de alcatrão, saída de voláteis inflamáveis e combustão (FUENTES-TALavera, 2002). Enquanto a temperatura aumenta, as paredes celulares poliméricas começam a ser degradadas, mas a pirólise da hemicelulose só acontece a partir de 270°C seguida pela celulose e lignina, esta última muito mais estável à temperatura (USDA, 2010).

Se a exposição acontece por pouco tempo, partes internas de grandes pedaços de madeira não irão reagir à temperatura circundante, então o efeito nas propriedades das partes internas será menor do que em outras partes. Para exposições extensas, pode ser considerado que a peça inteira irá reagir ao aquecimento e estará sujeita a uma perda permanente de resistência (USDA, 2010).

O esforço que uma peça de madeira pode suportar é afetado de forma expressiva pela direção da carga aplicada em relação à direção das fibras, à duração da carga, massa específica, teor de umidade e temperatura da madeira (MORESCHI, 2005).

A elasticidade é a propriedade da madeira sólida que a possibilita retomar a sua forma original após a remoção da carga aplicada que causou certa deformação. As propriedades elásticas são características de corpos sólidos, observada quando uma carga aplicada se situa abaixo do limite proporcional (LP) de elasticidade; quando se situa cima deste limite ocorrerão também deformações plásticas (irreversíveis) seguidas pela ruptura do material (MORESCHI, 2005).

O módulo de ruptura reflete o máximo carregamento suportado por um corpo de prova e é um critério de aceito, apesar de não ser um estresse verdadeiro por causa da fórmula, em qual o cálculo é válido apenas no limite elástico. (USDA, 2010). Para determinação da resistência máxima da madeira a partir de uma carga aplicada, definiu-se o módulo de elasticidade que MORESCHI (2005) expressa como a carga necessária para distender um corpo de 1 cm² de área transversal, a uma distância igual ao seu próprio comprimento, sendo apenas um valor teórico. Quando maior o valor de E, mais alta é a resistência do material e as propriedades mecânicas da madeira tendem a aumentar quando ela é arrefecida e a diminuir quando ela é aquecida. A TABELA 1 abaixo mostra as médias de valores de coeficiente de variação para algumas propriedades mecânicas da madeira sem defeitos (*defect-free wood*).

TABELA 1 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA MADEIRA EM DIVERSAS PROPRIEDADES

Propriedade	Média CV (%)
Flexão estática	
Módulo de ruptura	16
Módulo de elasticidade	22
Força Máxima	34
Flexão dinâmica	24
Compressão paralela as fibras	18
Dureza	20

FONTE: USDA (2010), WOOD HANDBOOK, 5-26

Segundo BATISTA, (2012) na busca de tecnologias que tornassem a madeira mais durável, técnicas industriais com produtos químicos preservantes de natureza oleossolúvel e hidrossolúvel foram sendo desenvolvidos como os tratamentos preservantes de madeira com arseniato de cobre cromatado (CCA), que pela toxicidade do arsênico quando em contato direto com o ser humano, já são proibidos pelos EUA (2003) e União Européia (2004).

O grau das transformações sofridas pelos polímeros constituintes da madeira e os efeitos atribuídos ao tratamento térmico é condicionado por fatores como temperatura, duração de tratamento, taxa de

aquecimento, atmosfera circundante (uso de pressão, água ou apenas ar quente e também da sua interação com a espécie utilizada). Os efeitos negativos, advindos do emprego de temperaturas elevadas, promovem a degradação da estrutura interna da madeira e consequentemente perda de resistência mecânica (MODES, 2010).

SYRJÄNEN *apud* CALONEGO (2009) afirma que a propriedade mais importante da madeira tratada termicamente quando comparada com a não tratada é a redução do seu teor de umidade de equilíbrio higroscópico e a consequente melhora na contração e no inchamento do material. Segundo KAMDEM (*et al* 2002) a madeira modificada termicamente apresenta também outras características tais como a cor escura, perda de massa, alterações químicas e maior capacidade de isolamento térmica.

A degradação nas hemiceluloses e na região amorfa da celulose contribui para o aumento do grau de cristalinização deste polímero. Adicionalmente a ligação entre lignina e polímeros ocorre devido à degradação térmica da madeira, responsável por reduzir a higroscopicidade e aumentar a estabilidade dimensional (BÄCHE, 2010; BHUIYAN, 2000; METSÄ-KORTELAJINEN, 2005; SEVERO, 2012; VERNON, 2001; WIRKBERG & MAUNU, 2004 *apud* COLENGO, 2009).

A degradação térmica das hemiceluloses resulta em menor higroscopicidade e maior estabilidade dimensional da madeira também estes benefícios são acompanhados por uma significativa redução na resistência à flexão estática e encontram-se estreitamente correlacionados com a perda de hemiceluloses. A rigidez e a resistência à compressão são menos afetadas, porque são mais relacionadas com celulose e lignina, que são mais resistentes à degradação térmica (ESTEVEZ *apud* KOCAEFE *et al*, 2008).

A perda de massa de hemiceluloses aumenta a proporção da fração de celulose cristalina na parede celular. Quando a quantidade de ligações celulose-celulose (mais rígidas) aumenta, em detrimento das ligações hemiceluloses-celulose-hemiceluloses (mais flexíveis), a flexibilidade da madeira diminui. A ramificação da lignina e a cristalização da celulose, causadas pela ação do calor, também contribuem para a redução da resistência mecânica da madeira (KOCAEFE *et al.*, 2008).

PHUONG *apud* CADEMARTORI (2012) discorreu sobre o aumento significativo da friabilidade com o acréscimo da temperatura e da duração dos tratamentos e sugeriu que a realocação da lignina foi o fator responsável pela friabilidade, somada à perda de massa da fração amorfa da parede celular.

BRITO (*et al* 2006) pesquisou as alterações ocorridas na densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação, relatando alterações significativas nas características anisotrópicas apenas em temperaturas acima de 200°C.

MODES (2010) relatou os efeitos da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*, afirmando que o tratamento térmico fornece melhorias às propriedades higroscópicas e melhoria na estabilidade dimensional, distinguindo ainda o comportamento mecânicos entre as espécies e concluiu o aumento da resistência a degradação biológica.

CALONEGO (2009) analisou os efeitos da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* concluindo na redução da susceptibilidade a fungos deterioradores em madeira modificada termicamente.

BELLON (2013) analisou a qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente, constatando que a madeira adquiriu resistência biológica quando submetida à intempérie para utilização em exteriores como mini decks.

A cor é uma das características mais importantes para a identificação e indicação de usos de espécies de madeira, principalmente quando associada aos aspectos de textura e desenho (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001). GRIEBELER (2013) discutiu a colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* modificada termicamente, avaliando a variação da cor da madeira e sua influência estética a partir do apelo visual que o material adquire e discutiu a preferência humana por madeiras de coloração escura. Ainda segundo GRIEBELER (2013) a alteração artificial da cor da madeira, por meio de tratamentos térmicos, pode ser uma alternativa para aumentar a

comercialização de espécies pouco utilizadas devido ao aspecto negativo particular de sua cor.

BRITO (*et al* 2011) analisaram os efeitos da termorretificação sobre a propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, avaliando a agregação de valor à madeira a partir da modificação térmica, promovendo o escurecimento das espécies e as aproximando de madeiras de maior valor agregado.

BATISTA (2012) discorreu ainda sobre os processos em escala industrial que se encontram bem estabelecidos em países europeus onde se pode encontrar as patentes *ThermoWood* (Finlândia), *Retification* e *Perdure* (França), *Plato* (Holanda) e *Menz OHT* (Alemanha). Ainda BATISTA (2012) afirma que por mais que haja tecnologia no Brasil para escala industrial, (*TWBrazil* detentora da patente *VAP HolzSysteme*), a cultura de tratar termicamente a madeira ainda não está difundida e pesquisas devem ser feitas para definir as variáveis ideais para cada produto final desejado.

BATISTA (2012) apresentou tese de doutorado sobre a modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro *VAP HolzSysteme®*, propondo a continuidade de pesquisas para o uso de madeira modificada termicamente em escala industrial, principalmente no ajuste das variáveis do processo para minimização de defeitos e direcionamento adequado para cada espécie.

Para SYRJANEN *apud* CADEMARTORI (2012), a retificação térmica da madeira deve ser considerada como uma alternativa de tratamento do material e utilizado para uma série de propósitos, tais como fabricação de portas, janelas e móveis de cozinha, uso em jardins e pisos, entre outros.

Segundo o USDA (2010) todos os tratamentos térmicos de madeira permitem que o produto final seja colado e receba revestimento, como tintas e vernizes, podendo ser utilizado como móveis, pisos, decks, componentes de portas e janelas e fachadas exteriores. É importante ressaltar que a qualidade do produto final à modificação térmica depende da matéria-prima, pois o processo assegura a alteração de algumas propriedades, sendo vantajosas

para algumas aplicações e desvantajosas para outras aplicações (BATISTA, 2012).

Ainda BATISTA (2012) afirma que existem divergências sobre a temperatura ideal para o tratamento térmico assim como o tempo de aplicação, porém a grande maioria concorda na utilização de vapor saturado para amenizar a perda de resistência mecânica das peças tratadas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

A madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada para o tratamento térmico foi proveniente de plantio comercial do Uruguai e se encontrava seccionada em tábuas no Departamento de Física e Tecnologia da Madeira da Universidade de Hamburgo (*Fachbereich Holzphysik und Mechanische Holztechnologie – Universität Hansestadt Hamburg*) na cidade de Hamburgo, Alemanha.



FIGURA 1 – CORPOS DE PROVA DIVIDIDOS EM K-CONTROLE, H1-TRATAMENTO1 E H2-TRATAMENTO 2

Foi determinado o teor de umidade inicial das tábuas de madeira a partir da norma DIN 52 183. As amostras foram redimensionadas em 39 corpos de prova (480mm x 80mm x 30mm). Após pesados e medidos em espessura, largura e comprimento, os novos corpos de prova foram divididos em três grupos como mostra a FIGURA 1: controle (Kontrolle – K), tratamento 1 (Hitzebehandlung 1 – H1) e tratamento 2 (Hitzebehandlung 2 – H2).

4.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Os corpos de prova do grupo controle K (sem tratamento) seguiram para uma câmara climatizada de 20°C e 65% de umidade relativa (UR) do ar. Para os tratamentos térmicos (H1 e H2) foi utilizado um forno mufla (FIGURA 2), sem circulação de ar e com presença de vapor d'água. Os grupos H1 e H2, embalados em papel alumínio (FIGURA 3), foram empilhados dentro do forno com auxílio de separadores como mostra a FIGURA 4.



FIGURA 2 – FORNO TIPO MUFLA HERAEUS INSTRUMENTS



FIGURA 3 - CORPO DE PROVA SENDO EMBALADO EM FOLHA DE ALUMÍNIO



FIGURA 4 - CORPOS DE PROVA EMBALADOS EM FOLHA DE ALUMÍNIO E EMPILHADOS DENTRO DO FORNO COM AUXÍLIO DE SEPARADORES



FIGURA 5 - PINO SENSOR INSERIDO EM CORPO DE PROVA LOCALIZADO MAIS AO CENTRO DA PILHA

O corpo de prova localizado mais ao centro da pilha recebeu um pino sensor que informou a temperatura da madeira durante todo processo de

tratamento térmico como registrado na FIGURA 5. Outro pino sensor informou a temperatura interna da mufla.

Os tratamentos térmicos não seguiram normas, pois elas ainda não existem ou são detidas por patentes protegidas judicialmente. As variáveis referentes aos tratamentos foram determinadas próximas ao encontrado em literatura científica publicada, sendo as temperaturas e tempo de tratamento determinados com base em outros experimentos realizados.

Para o tratamento térmico H1 o forno carregado foi inicialmente aquecido a Temp. 80°C por 24 h. Foram necessárias nove horas para que a temperatura do pino sensor localizado dentro do corpo de prova indicasse Temp. de 150°C. A partir disso, manteve-se a temperatura por 4 horas. As amostras foram pesadas imediatamente após o término do tempo determinado e seguiram para a câmara climatizada (Temp.: 20°C, UR: 65%), até alcançarem equilíbrio com o ambiente. Pesagens subsequentes determinaram o peso de equilíbrio das amostras. A curva do aumento da temperatura em função do tempo de aquecimento para o tratamento H1 é exposta na FIGURA 6 abaixo.

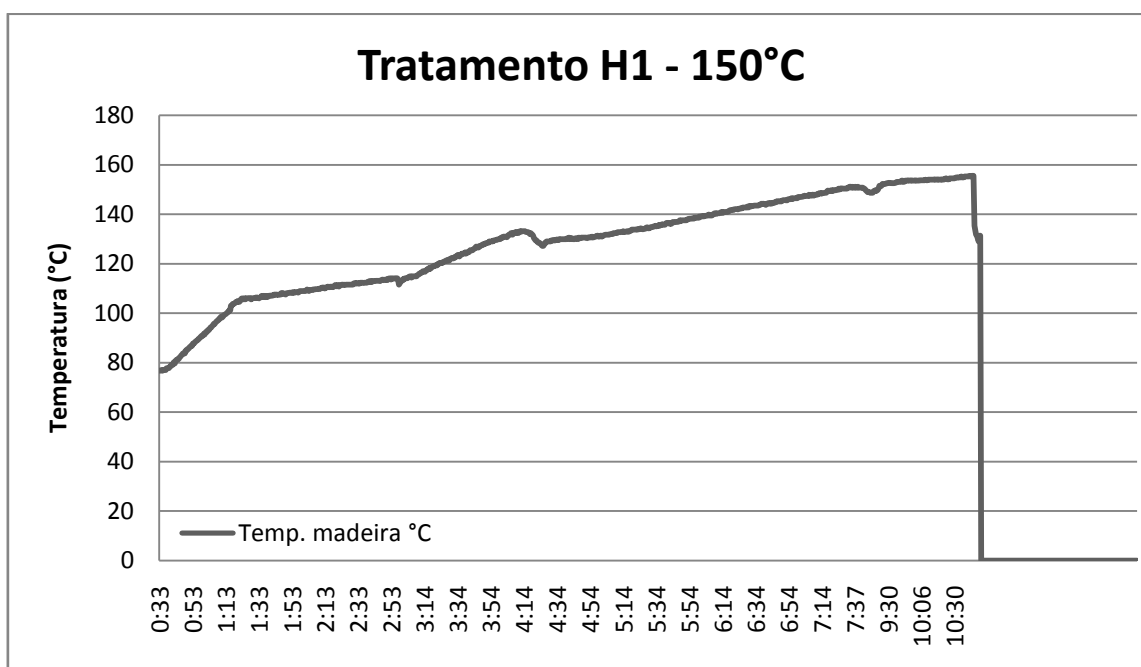


FIGURA 6 - CURVA DE TEMPERATURA PARA O TRATAMENTO TÉRMICO H1-150°C

Para o tratamento térmico H2 a mufla foi aquecido até Temp. 80°C permanecendo por 72 h e posteriormente aumentada a Temp. para 100°C permanecendo por mais 24 h. Ao alcançar a Temp. máx. de 200°C deu-se início ao tratamento, que durou 3 h. Neste aquecimento ocorreu um desligamento inesperado da mufla que é representada pela queda da temperatura nas horas iniciais ao procedimento, visíveis na curva decrescente do gráfico da FIGURA 7, mas que não afetou o restante do tratamento.

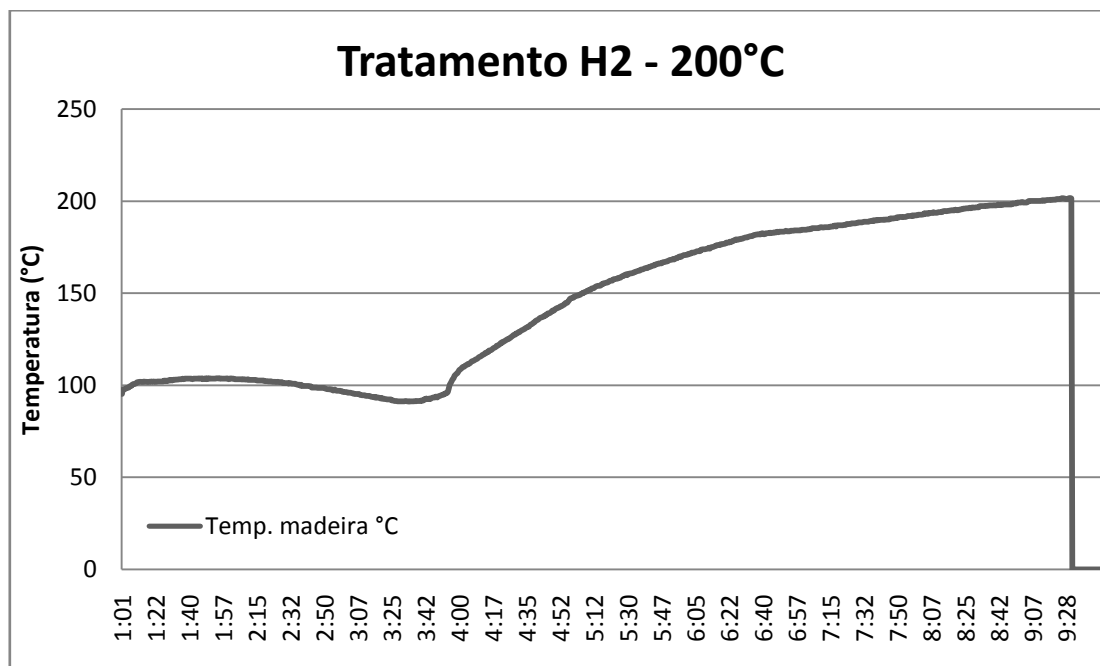


FIGURA 7 - CURVA DE TEMPERATURA PARA O TRATAMENTO TÉRMICO H2-200°C

Neste último procedimento as amostras não foram pesadas imediatamente após o tratamento, que foi mais agressivo para a madeira, pois foi desejável que não se desenvolvessem rachaduras nas amostras. Após uma semana, os corpos de prova do grupo H2 foram encaminhados para a câmara climatizada (Temp.: 20°C, UR: 65%) e foram periodicamente pesados até detecção do alcance do peso de equilíbrio com o ambiente.

Os parâmetros de temperatura e tempo dos aquecimentos e do tratamento térmico são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - PARÂMETROS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, T.U.: TEOR DE UMIDADE, t.(H): TEMPO EM HORAS

T.U. (inicial): 15,72%	Tratamento térmico H1	Tratamento térmico H2
Temp. de aquecimento I	80°C	80°C
t _(H) de aquecimento I	24	72
Temp. de aquecimento II	não se aplicou	100°C
t _(H) de aquecimento II	não se aplicou	24
Temp. de tratamento	150°C	200°C
t _(H) de tratamento	4	3

4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A preparação dos corpos de provas para os ensaios físicos, mecânicos e óptico seguiram especificações normatizadas (DIN). A FIGURA 8 apresenta as regiões do corpo de prova inicial utilizada para confecção das amostras.

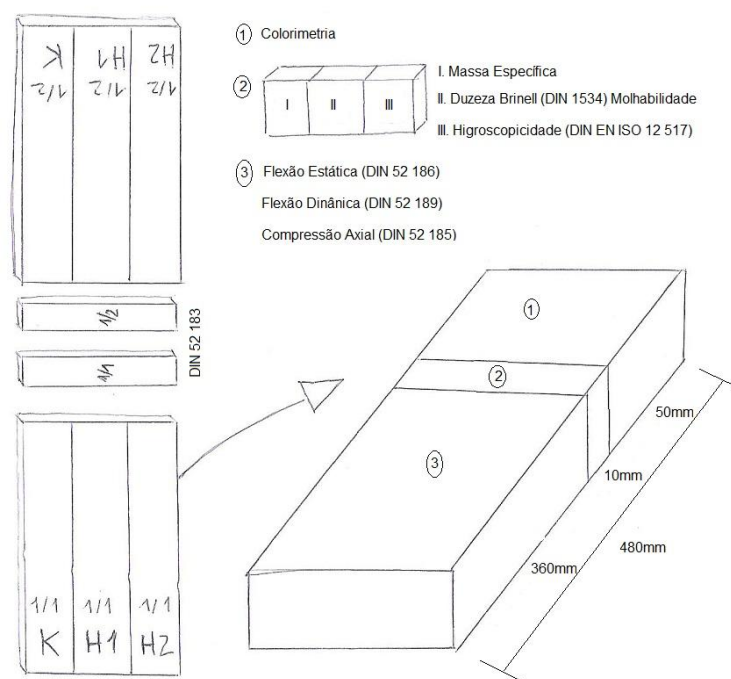


FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVAS PARA OS ENSAIOS SUBSEQUENTES

Os novos corpos de prova receberam marcações e foram armazenados em câmara climatizada (Temp.: 20°C, RH: 65%).

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas pelo software *Statgraphics*. Os dados coletados foram analisados utilizando estatística descritiva e análise de variância (ANOVA) considerando um fator (tratamento térmico). Para todos os ensaios analisados foi compilado um sumário estatístico com valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação. O desvio padrão representa a variação existente em relação à média e o coeficiente de variação expressa o desvio padrão como porcentagem da média. A análise de variância utilizada foi unidirecional, permitindo comparação múltipla determinando médias para cada grupo separadamente e definindo qual média é significativamente diferente da outra. Foram indicadas diferenças entre as médias com 95% de nível de confiança utilizando o método de Tukey (HSD – *honestly significant difference*). Com a utilização deste método há 5% de risco de chamar de significativamente diferente um ou mais pares de média quando sua diferença não é significativa.

Foi compilada a tabela ANOVA, que decompõe a variância total de uma variável dependente em componentes independentes que podem ser atribuídas a distintas causas (fatores e interações). Devemos saber que o modelo realiza um contraste de hipóteses para a qual a hipótese nula é a igualdade de médias entre as subpopulações que definem os diferentes níveis do fator. Foi determinado o valor estatístico F-ratio cujo valor refere-se à hipótese nula, (distribuição de *Fischer-Snedecor*), apresentando uma proporção da estimativa entre grupos para a estimativa dentro dos grupos.

4.5 PROPRIEDADES FÍSICAS

4.5.1 MASSA ESPECÍFICA (ME)

A massa específica reflete as características de resistência da madeira. Madeiras “pesadas” são em geral mais resistentes, elásticas e duras. Já madeiras com menor massa específica, tendem a apresentar diminuição da resistência mecânica e estabilidade dimensional (KLITZKE, S/A).

4.5.1.1 ME BÁSICA

A massa específica básica foi determinada a partir do método do máximo teor de umidade (MTU), conforme Smith (1945). As amostras foram colocadas em recipiente contendo água, até atingir a saturação. A madeira saturada foi levemente seca com papel pesada em balança digital e medidas com paquímetro digital. Em seguida os corpos de prova foram colocados em estufa à Temp: 103°C, para retirada da água higroscópica por 24h. Posteriormente as amostras foram novamente pesadas e medidas. Para determinação da massa específica básica foi utilizada a equação 1.

$$ME_b = \left(\frac{M_{seca}}{V_{sat}} \right) * 100 \quad \text{(EQUAÇÃO 1)}$$

Onde:

ME_b (g/cm³): massa específica básica

M_{seca} (g): massa das amostras a 0%

V_{sat} (cm³): volume das amostras saturadas

4.5.1.2 ME APARENTE

A massa específica aparente da madeira é a relação entre sua massa e volume a um teor de umidade conhecido. No presente trabalho a massa específica aparente para os três grupos foi determinada a um teor de umidade de 12% pela equação 2.

$$ME_{ap} = \frac{M_u}{V_u} \quad (\text{EQUAÇÃO 2})$$

Onde:

ME_{ap} (g/cm³): massa específica aparente

M_u (g): massa da madeira no teor de umidade de 12%

V_u (cm³): volume da amostra no teor de umidade de 12%

4.5.2 COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO

Para conhecer os efeitos do tratamento térmico no comportamento higroscópico, uma análise de sorção foi realizada. A determinação do comportamento da madeira em ceder ou ganhar umidade de acordo com as condições do meio ambiente que a rodeia foi obtida através da norma DIN EN ISO 12 517 (2000) pelo equipamento SPSx-1 μ (Pro Umid Ulm), como mostra a FIGURA 10, que possui uma balança automatizada de pesagem que permite detectar a sorção (absorção e adsorção) de água para até 23 amostras simultaneamente.

O analisador controla e simula diferentes estágios climáticos (T_{amb} , UR) a uma temperatura constante de $T_{amb.} = 20^{\circ}\text{C}$ para diferentes valores de umidade relativa do ar (20%, 35%, 50%, 65%, 80%, 92%). A FIGURA 9 retrata as amostras do grupo de controle, H1 e H2 que foram dimensionadas em quadrados, retângulos e *flakes* e colocadas dentro de pequenos recipientes de

alumínio. Do total de amostras, sete foram selecionadas do grupo de controle e oito representaram respectivamente cada tratamento térmico.

O peso de cada amostra foi medido periodicamente até a determinação de uma alteração menor que 0,1% em 24 h. O ciclo de pesagem foi repetido a cada 15 minutos e iniciado um novo estágio climático sempre que as condições de equilíbrio foram alcançadas. Quando todo o programa configurado terminou, as amostras foram removidas do equipamento e secas a 103°C até o alcance da massa constante. As amostras foram condicionadas em temperatura ambiente em dessecador por 30 min e então pesadas após 24 e 48 h.

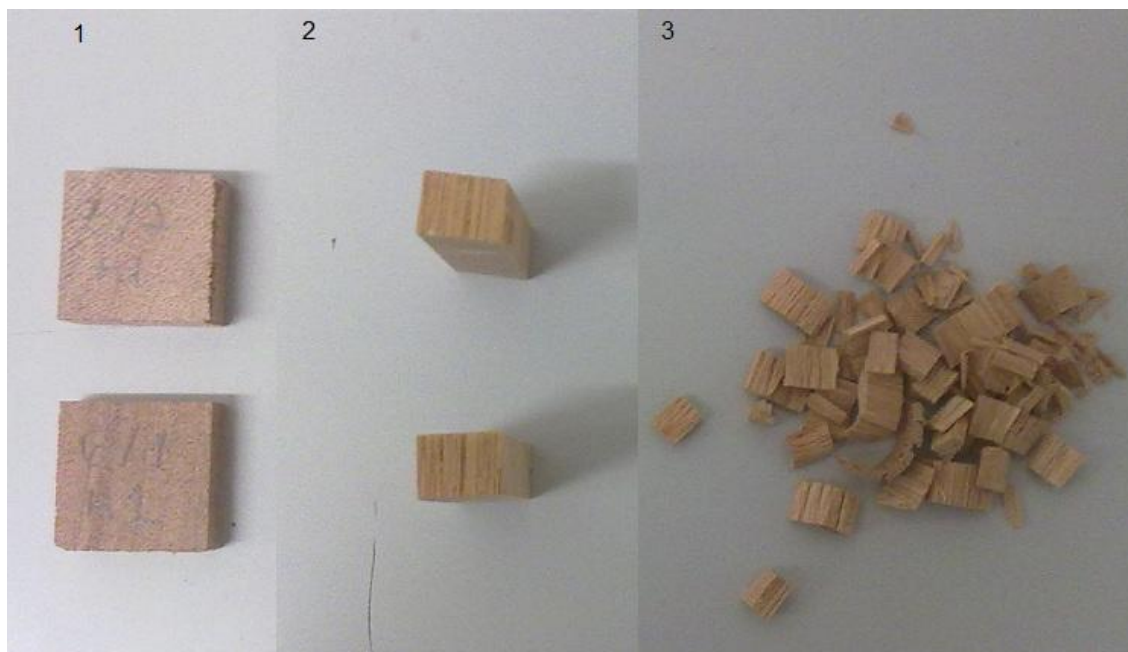


FIGURA 9 - DIMENSÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE HIGROSCOPICIDADE 1) SEÇÃO TRANSVERSAL 2) RETÂNGULOS 3) FLAKES



FIGURA 10 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE COM OS CORPOS DE PROVA DISPOSTOS EM RECEPIENTES DE ALUMÍNIO

4.5.3 MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE

Para determinação da molhabilidade superficial da madeira foi realizado o teste de determinação do ângulo de contato entre a água e a superfície da amostra. Este método indicado por CADEMARTORI (2012) consistiu na deposição de uma gota séssil de 5 μ L de água deionizada através do goniômetro Krüss DSA4, pertencente ao Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Paraná. As medições foram realizadas em sala climatizada (Temp. 20°C, UR 40%).



FIGURA 11 - GOTA DE ÁGUA MOMENTOS ANTES DO CONTATO COM A SUPERFÍCIE DA MADEIRA

O experimento foi filmado, o que permitiu a observação da dinâmica da gota d'água, assim como a alteração do ângulo de contato com a superfície em um tempo pré determinado. O teste durou 5s e foram coletadas fotos em $t = 5044 \mu\text{s}$. As imagens permitiram a determinação do ângulo de contato através de software próprio. A FIGURA 11 mostra instantes antes da gota tocar a superfície da amostra de madeira modificada termicamente à 200°C .

4.5.4 PERDA DE MASSA

A perda de massa foi determinada a partir da massa inicial dos corpos de prova antes e depois dos tratamentos (EQUAÇÃO 3). Foi utilizada uma balança analítica com precisão de $0,001\text{g}$.

$$PM = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \quad (\text{EQUAÇÃO 3})$$

Onde:

PM (%): perda de massa

P_i (g): massa dos corpos de prova em equilíbrio antes do tratamento térmico

P_f (g): massa dos corpos de prova depois do tratamento térmico

4.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A TABELA 3 apresenta as propriedades mecânicas avaliadas, com suas respectivas normas, dimensões e número de corpos de prova ensaiados por tratamento. Os ensaios de flexão estática perpendicular às fibras e compressão axial paralela às fibras foram realizados em uma máquina de ensaios automática Zwick/Roell Z050 provida de um software para tabulação dos dados obtidos. Já os ensaios de flexão dinâmica perpendicular às fibras e dureza Brinell foram realizados em máquinas específicas para esses tipos de teste de acordo com a normatização alemã DIN (*Deutsches Institut für Normung*). Todos os ensaios ocorreram nos laboratórios do Departamento de Física e Tecnologia da Madeira na Universidade de Hamburgo, em salas climatizadas (Temp.: 20°C, RH: 65%) sob a supervisão do Dr. Johannes Welling do Instituto Thünen para Pesquisas em Madeira (*Thünen-Institut für Holzforschung*).

TABELA 3 - ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, NORMAS UTILIZADAS, DIMENSÃO E NÚMERO DE C.P. (CORPOS DE PROVA) POR TRATAMENTO

ENSAIO	NORMA	DIMENSÃO (mm)	NÚMERO DE C.P./TRATAMENTO (K / H1 / H2)
Flexão estática	DIN 51 186	360 x 20 x 20	26 / 26 / 26
Flexão dinâmica	DIN 52 189	300 x 20 x 20	26 / 26 / 26
Compressão axial	DIN 52 185	20 x 20 x 60	96 / 95 / 96
Dureza Brinell	DIN 1534	60 x 20 x 20	26 / 26 / 26

4.6.1 FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

A máquina de ensaio Zwick/Roell Z050 foi configurada para a realização do teste, a força aplicada foi de 50 KN. A FIGURA 12 registra um corpo de

prova que teve seu limite de ruptura ultrapassado, logo após o recuo da força aplicada pela máquina de ensaio.



FIGURA 12 - CORPO DE PROVA QUE TEVE SEU LIMITE DE RUPTURA EXTRAPOLADO, APÓS O RECUO DA FORÇA APLICADA PELA MÁQUINA DE ENSAIO

A $F_{\text{máx}}$ e o β_B (módulo de ruptura) foram determinados no momento da ruptura. O módulo de elasticidade EB para flexão estática foi calculado pela EQUAÇÃO 4.

$$EB = \left(\frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \right) \cdot \left(\frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad (\text{EQUAÇÃO 4})$$

Onde:

l (mm): comprimento entre os apoios da máquina de ensaio

ΔF (N): variação da força na região para deformação elástica

Δf (mm): a deflexão no centro do corpo de prova

b, h (mm): arestas da seção transversal do corpo de prova, referentes a largura e altura, respectivamente.

4.6.2 FLEXÃO DINÂMICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

A máquina de ensaio utilizada para este teste, registrada na FIGURA 13, consiste em dois apoios laterais (vão de 24 cm) e um pêndulo móvel que quando solto manualmente, vai de encontro ao corpo de prova, registrando o trabalho absorvido para romper o corpo de prova.

O coeficiente de resiliência “a” foi calculado através da EQUAÇÃO 5.

$$a = \frac{W}{b \cdot h} \quad (\text{EQUAÇÃO 5})$$

Onde:

W (kg.m): trabalho absorvido para romper o corpo de prova

b e h (cm): arestas da seção transversal do corpo de prova, referentes a largura e altura, respectivamente.



FIGURA 13 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

4.6.3 COMPRESSÃO AXIAL PARALELA ÀS FIBRAS

A máquina de ensaio Zwick/Roell Z050, utilizada no ensaio de flexão estática perpendicular as fibras, foi configurada para a realização do teste de compressão axial. A força aplicada foi de 50 KN. A FIGURA 14 registra a configuração da máquina sob o corpo de prova. O corpo de prova é segurado por garras mecânicas e a força é aplicada no sentido axial.

A $F_{máx}$ e o σ_B (módulo de ruptura) foram determinados no momento da ruptura. O módulo de elasticidade E_D para compressão axial foi calculado pela EQUAÇÃO 6.

$$E_D = \frac{F_{máx}}{A} = \frac{F_{máx}}{a \cdot b} \quad (\text{EQUAÇÃO 6})$$

Onde:

$F_{máx}$ (N): força máxima

A (mm²): área da superfície transversal do corpo de prova antes do início do ensaio

a, b : dimensões da seção transversal



FIGURA 14 - MÁQUINA DE ENSAIO CONFIGURADA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL COM GARRAS MECÂNICAS NO C.P.

4.6.4 DUREZA BRINELL

A dureza Brinell determinada na máquina de ensaio Zwick/KG (Z 425) (FIGURA 15) e calculada com os dados obtidos na realização do teste que consiste em uma esfera metálica com diâmetro de 10 mm forçada, mediante a uma força de 500 N, contra a superfície da madeira durante um período de 15 segundo.

A carga máxima é então mantida por mais 30 segundo. A determinação da dureza Brinell é dada pela EQUAÇÃO 7.

$$HB = \frac{2F}{[(g \cdot \pi \cdot D) \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})]} \quad (\text{EQUAÇÃO 7})$$

Onde:

D (mm): diâmetro da esfera metálica

d (mm): diâmetro médio das concavidades provocadas no corpo de prova (determinação com lupa)

g (m/s²): aceleração da gravidade

F (N): força aplicada



FIGURA 15 - MÁQUINA DE ENSAIO PARA O TESTE DE DUREZA PELO MÉTODO DE INSERÇÃO DE ESFERA

4.7 PROPRIEDADE ÓPTICA

4.7.1 COLORIMETRIA

Para determinação da cor da madeira foi utilizado o colorímetro manual para objetos e superfícies coloridas Minolta CR310 (FIGURA 16) fornecendo as unidades de medidas padrão de cor CIE (Hunt 1995) L^* , a^* e b^* (adimensionais), onde L^* define a posição no eixo preto-branco, a^* a posição no eixo vermelho-verde e b^* a posição no eixo azul-amarelo, como pode ser observado pela FIGURA 17.



FIGURA 16 - COLORÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DAS UNIDADES DE MEDIDA PADRÃO DE COR CIE DE ACORDO COM OS EIXOS L^* a^* E b^*

O diâmetro do círculo de medição da cor na superfície da amostra foi correspondente a uma área de $0,78 \text{ cm}^2$. Com os parâmetros obtidos na leitura do aparelho, foi possível calcular a saturação C a partir da EQUAÇÃO 8 e o parâmetro do ângulo de tinta h^* a partir da EQUAÇÃO 9:

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 8})$$

Onde:

a^* : coordenada cromática do eixo verde vermelho

b^* : coordenada cromática do eixo azul amarelo.

$$h^* = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (\text{EQUAÇÃO 9})$$

O ângulo de tinta h^* localiza-se em volta do eixo axial L^* . Nesta graduação um $h = 0^\circ$ indica tonalidade vermelha e $h = 90^\circ$ indica tonalidade amarela, como pode ser observado na FIGURA 18. A saturação C^* é a distância entre a cor e o centro do plano cromático, isto é, a medida da intensidade da cor.

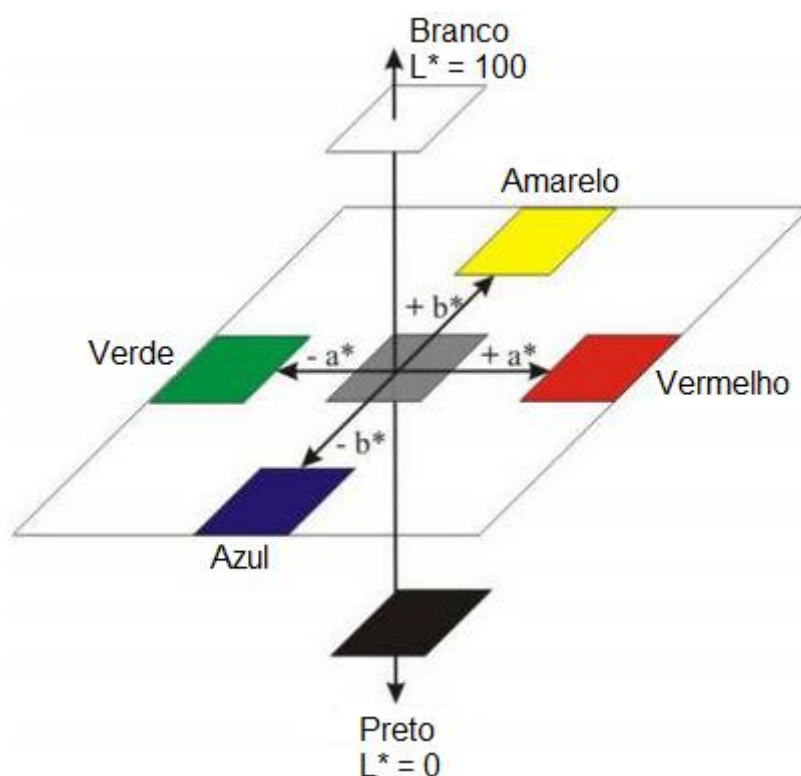


FIGURA 17 - EIXOS COORDENADOS L^* , A^* E B^* DA POSIÇÃO DA CORES DETECTADAS PELO COLORÍMETRO

A variação total de cor pode ser calculada a partir da claridade (L^*) e duas coordenadas de cor como a^* e b^* , utilizando a EQUAÇÃO 10.

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]} \quad (\text{EQUAÇÃO 10})$$

Onde:

ΔL^* : diferença da luminosidade $L^* - L^*_{\text{controle}}$

Δa^* : diferença da coordenada $a^* - a^*_{\text{controle}}$

Δb^* : diferença da coordenada $b^* - b^*_{\text{controle}}$

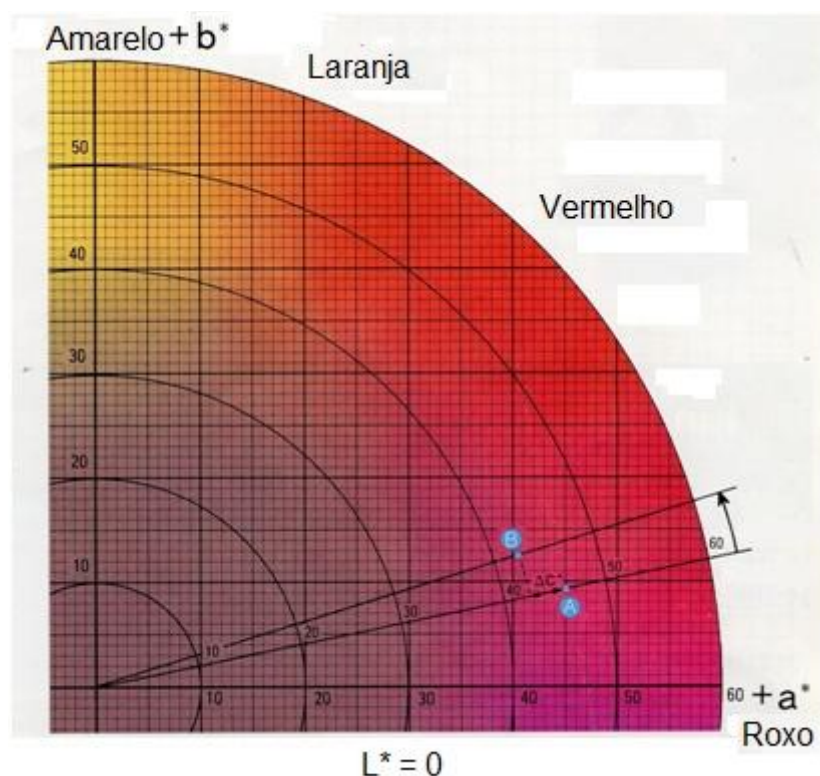


FIGURA 18 - ÂNGULO DE TINTA H^* EM VOLTA DO EIXO L^*

As medições foram feitas na superfície da madeira em três condições: a) face radial lixada b) face radial não lixada c) na região interna do corpo de prova através de corte central.

Foram evitadas as superfícies com defeitos, como faces com nó, que são naturalmente mais escuras. A pistola foi previamente calibrada e seguiu-se com a medição com calibragens a cada novo grupo de amostras testado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

5.1.1 MASSA ESPECÍFICA

5.1.1.1 ME BÁSICA

Na tabela 4 é possível observar que a massa específica básica aumenta para os tratamentos térmicos, porém a análise estatística indica os resultados como não significativamente diferentes entre si.

TABELA 4 - MASSA ESPECÍFICA BÁSICA PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	Massa Específica Básica (g/cm ³)
Controle	Média	0,4840 ^A
	(desvio padrão)	(0,0511)
	(coef. de variação)	(10,5573%)
H1	Média	0,4758 ^A
	(desvio padrão)	(0,0642)
	(coef. de variação)	13,4874%
H2	Média	0,5159 ^A
	(desvio padrão)	(0,0830)
	(coef. de variação)	(16,0883%)
ANOVA F-Ratio		0,49

CADEMARTORI (2012) observou nas madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloezina* valores médios estatisticamente distintos, onde as espécies *saligna* e *cloezina* também apresentaram incremento da massa específica básica. CALONEGO (*apud* CADEMARTORI, 2012) identificou redução da massa específica básica para a madeira de

Eucalyptus grandis, porém os valores se mostraram insignificantes e sem tendência em função do tratamento.

Foi observado que o tratamento térmico não influencia diretamente na perda de massa específica básica.

5.1.1.2 ME APARENTE

Na tabela 5 é possível observar que a massa específica aparente foi reduzida após os tratamentos térmicos, sendo os valores encontrados para os tratamentos H1 e H2 não significativamente diferente entre si.

TABELA 5 - MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	Massa Específica Aparente (g/cm³)
Controle	Média	0,6225 ^A
	(desvio padrão)	(0,0761)
	(coef. de variação)	(12,2355%)
H1	Média	0,5552 ^B
	(desvio padrão)	(0,0781)
	(coef. de variação)	(14,0706%)
H2	Média	0,5695 ^B
	(desvio padrão)	(0,0822)
	(coef. de variação)	(14,4355%)
ANOVA F-Ratio		5,25

CADEMARTORI (2012) observou que a massa específica aparente (0%) para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* decresceram após os tratamentos térmicos e afirmou que a redução da massa específica pode estar associada à perda de massa dos corpos de prova e a modificação na estrutura anatômica da madeira modificada termicamente.

BRITO *et al* (*apud* CADEMARTORI, 2012) estudou o comportamento da massa específica da madeira modificada termicamente de *Eucalyptus grandis* e não encontrou redução significativa.

A proporção de vasos, predominante nas espécies madeireiras folhosas possibilita a redução da massa específica, pois segundo BOONSTRA *et al* (*apud* CADEMARTORI, 2012) as folhosas são sensíveis a ocorrência de colapsos dos vasos e deformação das fibras libriformes localizadas perto dos vasos. É possível observar que as madeiras tratadas termicamente não absorvem água como o grupo controle, pois perdem a capacidade de reidratação devido a indisponibilidade de grupos OH⁻ livres.

5.1.2 COMPORTAMENTO HIGROSCOPICO

As alterações higroscópicas na madeira foram analisadas com a passagem das amostras (Temp: constante de 20°C) por diferentes estágios climáticos de umidade relativa (UR) constantemente medida e alterada quando detectado o teor de umidade de equilíbrio da madeira (TUE), possibilitando a efeito típico da curva de histerese em todas as amostras como é observado nos gráficos da FIGURA 19 para madeira maciça e FIGURA 20 para flakes de madeira.

É possível observar em ambos gráficos que a madeira modificada termicamente reduz a sua capacidade de higroscópica, ou seja, não absorve umidade do ambiente eficientemente como o grupo controle para os diferentes estágios climático. É notável que a curva de histerese para o tratamento H1 é mais próxima ao controle do que ao tratamento H2, indicando que as alterações foram mais pronunciadas em temperatura maior a 150°C.

Os gráficos mostram que a umidade de equilíbrio da madeira é diferente da umidade relativa do ambiente, bem como indica que as amostras não atingem seu peso inicial, mesmo que retornem ao estado climático de início do experimento. Isso pode ser explicado pela incompleta reidratação da sorção durante os estágios subsequentes de adsorção.

A redução de hemiceluloses na madeira diminui a disponibilidade de grupos OH^- responsáveis pela adsorção da água. A perda de massa de hemicelulose causada pela degradação térmica da madeira pode ser a causa da redução da higroscopicidade, pois os grupos OH^- deixam de estar disponíveis para adesão da umidade na madeira.

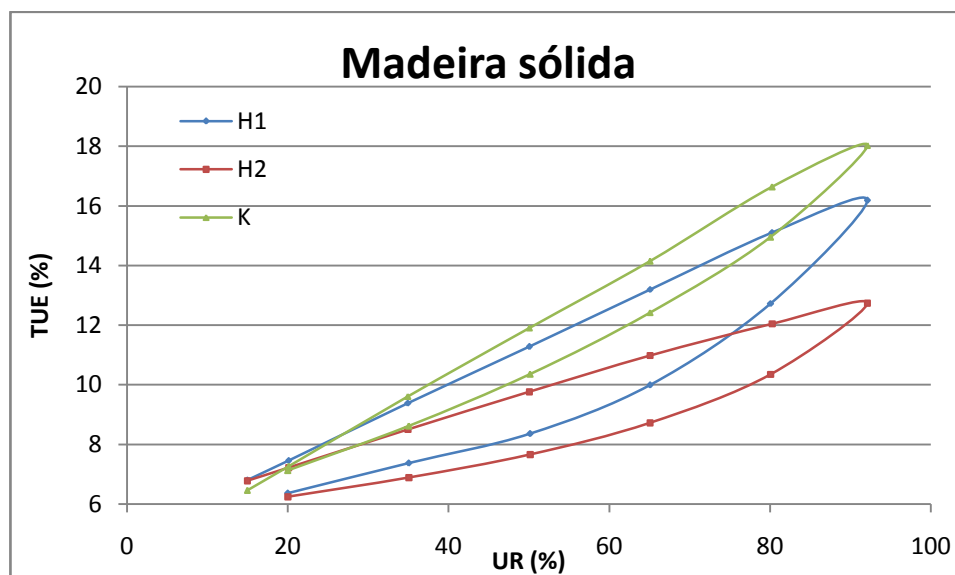


FIGURA 19 - CURVA DE DESORÇÃO E SORÇÃO PARA MADEIRA MACIÇA PARA OS GRUPOS K, H1 E H2 À 20°C

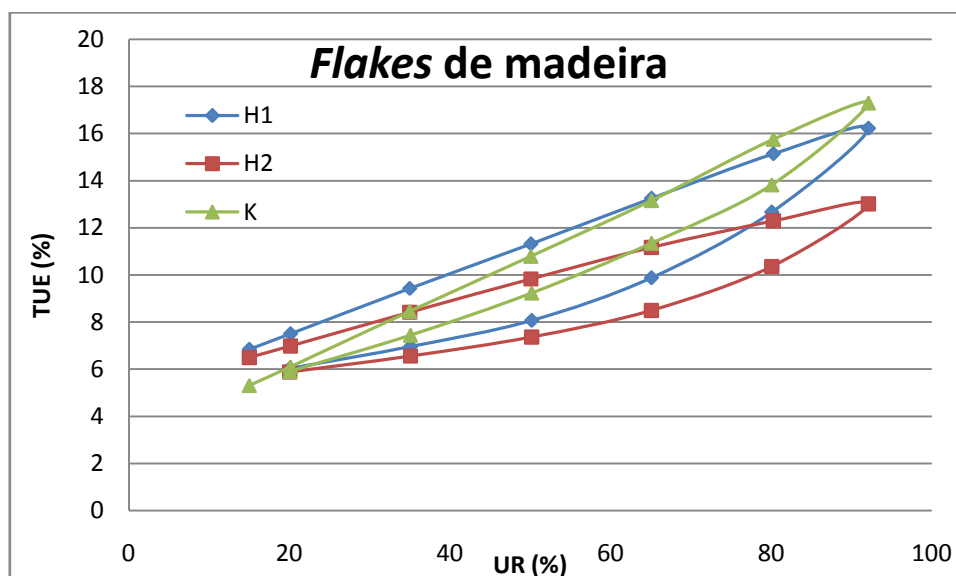


FIGURA 20 - CURVA DE DESORÇÃO E SORÇÃO PARA FLAKES MADEIRA PARA OS GRUPOS K, H1 E H2 À 20°C

Este comportamento foi explícito para pedaços maciços de madeira. Este fato ocorre porque a superfície de contato para os *flakes* de madeira é maior do que para os pedaços maciços, sendo assim os *flakes* tendem a interagir mais com o ambiente e as suas alterações.

SCHMIDT (2013) relatou para o bambu *Yushania alpina*, termicamente modificado a 180°C (2h e 5h) e a 200°C (2h), aparentemente um maior efeito de histerese. CADEMARTORI (2012) observou que as madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* tratadas termicamente apresentaram redução significativa do TUE em relação ao grupo de amostras de referência e verificou redução brusca desta variável nos tratamentos térmicos com temperaturas acima de 180°C.

5.1.3 MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE

A “molhabilidade” de um sólido por um líquido é dada a partir do ângulo de contato ou tensão de “umedecimento” que é definido como a tensão multiplicada pelo cosseno do ângulo de contato. A tensão da superfície pode ser calculada pelo método de gota séssil utilizando relações empíricas. (DORSEY 1928 *apud* KOCAEFE *et al.* 2008).

A TABELA 6 resume a análise estatística feita para o ângulo de contato obtido nos diferentes grupos de amostra, controle, H1 e H2.

Foi possível observar que a madeira apresentou hidrofobia nos tratamentos H1 e H2. Segundo as análises estatísticas o grupo controle apresentou diferença quando comparado separadamente ao grupo H1 e H2 respectivamente, porém quando os grupos de amostras tratadas termicamente são comparados entre si, não há diferença estatística significativa entre as médias. No teste de média, observou-se que o tratamento térmico foi significativo e aumentou a repelência superficial da madeira ao solvente (água deionizada), pois o ângulo de contato aumentou significativamente.

TABELA 6 - ÂNGULO DE CONTATO OBTIDO NO ENSAIO DE MOLHABILIDADE DA SUPERFÍCIE PARA GRUPOS DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	Ângulo de Contato (°)
Controle	Média	53,5027 ^A
	(desvio padrão)	(8,06355)
	(coef. de variação %)	(15,0713%)
H1	Média	64,1744 ^B
	(desvio padrão)	(14,4266)
	(coef. de variação %)	(22,4803%)
H2	Média	69,2923 ^B
	(desvio padrão)	(9,81007)
	(coef. de variação %)	(14,1575%)
ANOVA F-ratio		19.75

A FIGURA 21 mostra o ensaio para a medição do ângulo de contato para o grupo controle, H1 e H2, sendo evidente a diferença da interação da gota com a superfície da amostra não tratada termicamente e o mesmo efeito nas superfícies da madeira modificada termicamente.

O comportamento de hidrofobia da superfície da madeira pode ser explicado pela perda de massa das hemiceluloses que diminuem a disponibilidade de grupos OH- responsáveis por adsorver umidade. Esse comportamento pode ainda ser explicado pela deposição de extrativos e substâncias voláteis na superfície da madeira, auxiliando na impermeabilização.

KOCAEFE, D (*et al* 2008) trataram termicamente amostras de madeira de *Fraxinus americana* e *Acer rubrum* à 105°C para determinação da molhabilidade da madeira e concluíram que ocorreu aumento do ângulo de contato entre a madeira e a gota d'água, diminuindo a capacidade da madeira em absorver umidade e afirmam ainda que o método de gota séssil foi definido como ideal para determinação do ângulo de contato.

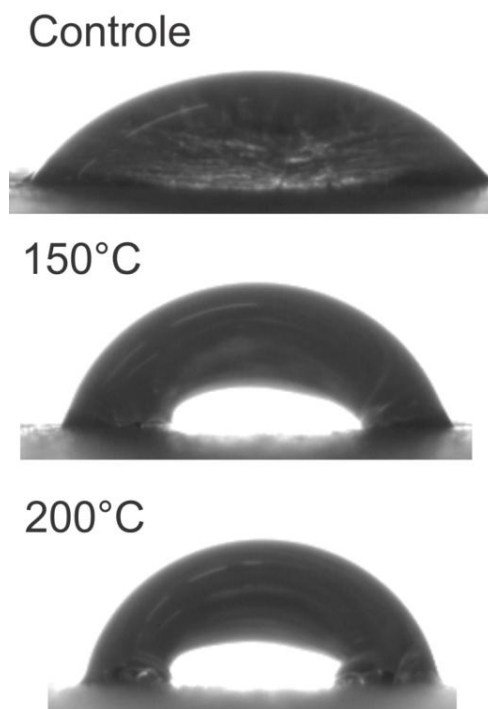


FIGURA 21 - INTERAÇÃO DA GOTA COM A SUPERFÍCIE DA MADEIRA DO GRUPO K, H1 E H2 PARA $T=5000\mu s$

5.1.4 PERDA DE MASSA

A TABELA 7 apresenta os valores médios e análise de variância para a perda de massa da madeira

Observa-se que o tratamento teve influência significativa na perda de massa, concluindo para o grupo H2 maior perda de massa. Esta perda de massa pode ser mascarada pela perda de água, uma vez que os corpos de prova perderam não só umidade durante os tratamentos, mas também substâncias voláteis e químicos constituintes da madeira.

HILL *apud* CADEMARTORI (2006) afirma que a perda de massa ocorre em índices mais altos quando a madeira é modificada. Porém depende da temperatura e da atmosfera do processo escolhido, ressaltando maiores índices de perda de massa em tratamentos com ar, condições úmidas e madeira de folhosas, em contrapartida índices mais baixos ocorrem em tratamentos com atmosfera inerte, sistemas aberto, condições secas e madeira de coníferas.

TABELA 7 - PERDA DE MASSA OBTIDO PELA EQUAÇÃO 1 POR GRUPO DE AMOSTRA E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	Perda de Massa (%)
\bar{X}	Média	12,3415 ^A
	(desvio padrão)	(2,13841)
	(coef. de variação %)	(17,3269%)
\bar{Y}	Média	16,54 ^B
	(desvio padrão)	(1,84417)
	(coef. de variação %)	(11,1498%)
	ANOVA F-ratio	57,48

5.2 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

5.2.1 FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR AS FIBRAS

Na TABELA 8 encontram-se as médias da resistência (módulo de ruptura), módulo de elasticidade e força máxima durante ensaios de flexão estática e o resumo da análise estatística.

As letras A e B sobrescritas indicam o resultado do teste de Tukey para a diferença estatisticamente relevante entre as médias dos grupos analisados (controle, H1 e H2). De acordo com o teste de Tukey, foi construído o gráfico do módulo de ruptura de acordo com o tratamento.

Conforme a TABELA 1 os valores do coeficiente de variação para o módulo de elasticidade e ruptura em ensaio de flexão estática para madeira sem defeitos aproximam-se ao valor encontrado para o grupo controle testado no presente trabalho, sendo menor do que os estipulados pelo USDA (2010) e mostrando-se significativo.

TABELA 8 - FORÇA MÁXIMA ($F_{m\acute{a}x}$), MÓDULO DE ELASTICIDADE (EB) E MÓDULO DE RUPTURA (βB) OBTIDO NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	EB (N/mm ²)	βB (N/mm ²)
Controle	Média	1784 ^A	12241 ^A	100 ^A
	(desvio padrão)	(212,556)	(1527,94)	(12,0205)
	(coef. de variação %)	(11,914%)	(12,4818%)	(12,0577%)
H1	Média	1412 ^B	11877 ^A	78 ^B
	(desvio padrão)	(346,136)	(1570,71)	(19,154)
	(coef. de variação %)	(24,5174%)	(13,2253%)	(24,4047%)
H2	Média	1246 ^B	12715 ^A	74 ^B
	(desvio padrão)	(331,61)	(2303,74)	(18,5342)
	(coef. de variação %)	(26,6123%)	(18,1178%)	(25,0454%)
	ANOVA F-Ratio	20,71	1,31	16,52

É possível observar na FIGURA 22 que os valores para o módulo de ruptura para a madeira tratada termicamente, caem em comparação ao grupo controle. É visível que a resistência máxima da madeira foi afetada com o aumento da temperatura do tratamento, sendo para o grupo H2 ainda menor que para H1.

Segundo o teste de homogeneidade das médias (LSD) para βB , o grupo controle de amostras apresentou estatisticamente diferença significativa de 95% de nível de confiança quando analisado separadamente para H1 e H2. Já os grupos H1 e H2 não apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Todos os corpos de prova do grupo de controle tiveram um padrão de ruptura distinto aos grupos H1 e H2, diferindo-se pelo grau de fragmentação das fibras na região da força aplicada. A ruptura do grupo de controle se deu por um descolamento das fibras da madeira e muitas das amostras não se partiram totalmente. Já a ruptura do grupo H1 e H2 apresentaram uma ruptura mais frágil e retilínea, sendo divididos exatamente ao meio após a falha, indicando friabilidade.

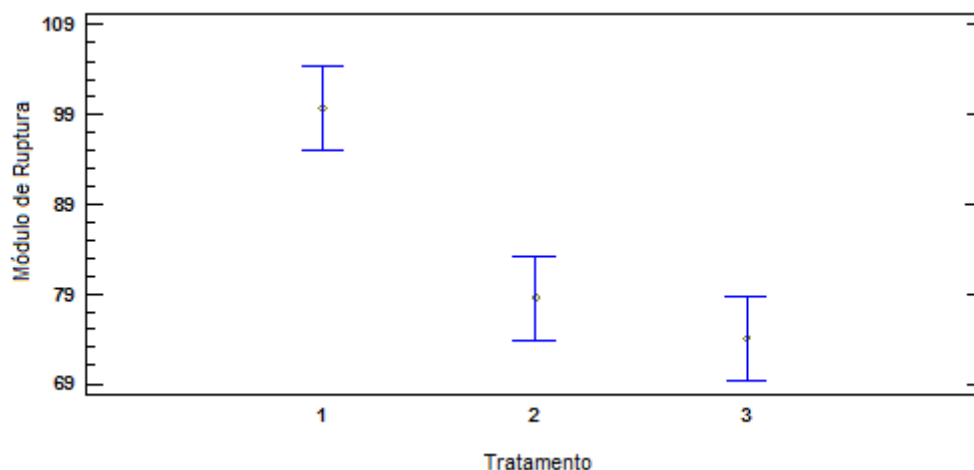


FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA 1) CONTROLE 2) H1 3) H2

A madeira modificada termicamente da folhosa *Fagus sylvatica* apresentou um padrão abrupto de falha, quando submetida a esforços de flexão estática, e este comportamento foi atribuído ao aumento da friabilidade (ARNOLD, 2010 *apud* BATISTA *et al.* 2012). Alguns autores afirmam que a madeira modificada termicamente torna-se mais friável por causa da perda de hemiceluloses (STAMM, 1964; VERNONIS, 2001; HILL, 2006; ESTEVES; PEREIRA, 2009 *apud* BATISTA, 2012).

5.2.2 FLEXÃO DINÂMICA PERPENDICULAR AS FIBRAS

Na TABELA 9 encontra-se o coeficiente de resiliência obtido nos ensaios de flexão dinâmica e análise estatística. É possível observar que o coeficiente de resiliência é maior para o grupo controle do que para os tratamentos térmicos, sendo possível afirmar que a temperatura influenciou negativamente a resistência da madeira ao choque.

Segundo o teste de homogeneidade das médias (LSD) o grupo controle apresentou estatisticamente diferença significativa de 95% de nível de confiança quando analisado separadamente para H1 e H2. Já os grupos H1 e H2 não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Todos os corpos de prova partiram-se ao meio, sendo a ruptura diferente para o grupo controle, que

apresentou uma ruptura com fibras visíveis e no caso dos grupos tratados termicamente, a ruptura apresentou ruptura mais frágil e retilínea, sendo divididos exatamente ao meio após a falha, indicando friabilidade, assim como para o ensaio de flexão estática perpendicular às fibras.

TABELA 9 - COEFICIENTE DE RESILIÊNCIA OBTIDO NOS ENSAIOS DE FLEXÃO DINÂMICA POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	Coef. de resiliência: a
Controle	Média	0,54564 ^A
	(desvio padrão)	(0,111181)
	(coef. de variação %)	(20,3763%)
H1	Média	0,21524 ^B
	(desvio padrão)	(0,0947287)
	(coef. de variação %)	(44,0107%)
H2	Média	0,200958 ^B
	(desvio padrão)	(0,0693444)
	(coef. de variação %)	(34,5069%)
ANOVA F-Ratio		107,59

Foi também notável a distinção do barulho no momento da ruptura, que se apresentou mais seco para os grupos tratados termicamente.

Não foi encontrado na literatura testes de flexão dinâmica para madeira tratadas termicamente, como o realizado pelo presente trabalho. Entretanto RAUTKARI *et al.*, (2013) relatou para *Pinus sylvestris*, a partir de cálculo do módulo de elasticidade dinâmico através de método ultra sônicos (54kHz) para corpos de prova condicionados (Temp: 20°C; RH: 65%), redução da resistência mecânica da madeira tratada termicamente à 120°C, 150°C e 180°C.

Segundo a TABELA 1, o valor para o coeficiente de variação encontrado para madeira livre de defeitos é maior que o definido pelo presente trabalho, mostrando-se um resultado significativo.

5.2.3 COMPRESSÃO AXIAL PARALELA AS FIBRAS

Na TABELA 10 encontra-se o resultado do ensaio de compressão paralelo às fibras para módulo de ruptura, módulo de elasticidade e força máxima suportada e o gráfico da FIGURA 23 abaixo retrata a distribuição de dados para o módulo de ruptura e a sua variância. Segundo o gráfico houve um decaimento da resistência máxima da madeira para os tratamentos térmicos H1 e H2 em comparação com o grupo de controle. Este comportamento é considerado típico uma vez que aplicação de calor degrada cadeias celulósicas, diminuindo a resistência mecânica da madeira, em principal a compressão axial paralela às fibras.

TABELA 10 – FORÇA MÁXIMA ($F_{m\acute{a}x}$), MÓDULO DE ELASTICIDADE (ED) E MÓDULO DE RUPTURA (σ_D) OBTIDO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	ED (N/mm ²)	σ_D (N/mm ²)
Controle	Média	25564,1 ^A	15707,0 ^A	62,7031 ^A
	(desvio padrão)	(3635,85)	(2788,73)	(8,45847)
	(coef. de variação %)	(14,2225%)	(17,7547%)	(13,4897%)
H1	Média	23253 ^B	14593,5 ^B	57,1789 ^B
	(desvio padrão)	(3343,45)	(2725,65)	(7,97061)
	(coef. de variação %)	(14,3787%)	(18,6771%)	(13,9398%)
H2	Média	21604,9 ^C	14928,1 ^B	53,6964 ^C
	(desvio padrão)	(2991,09)	(2260,27)	(7,53871)
	(coef. de variação %)	(13,8445%)	(15,141%)	(14,0395%)
ANOVA F-ratio		34,16	4,61	30,95

Estes resultados são compatíveis com BATISTA (2012) que analisou a compressão axial para *Eucalyptus grandis* e confirmou que o efeito da temperatura foi significativo para a redução do módulo de elasticidade assim como para o módulo de ruptura, sendo que para as temperaturas de 140°C e 160°C a redução não foi significativa estatisticamente.

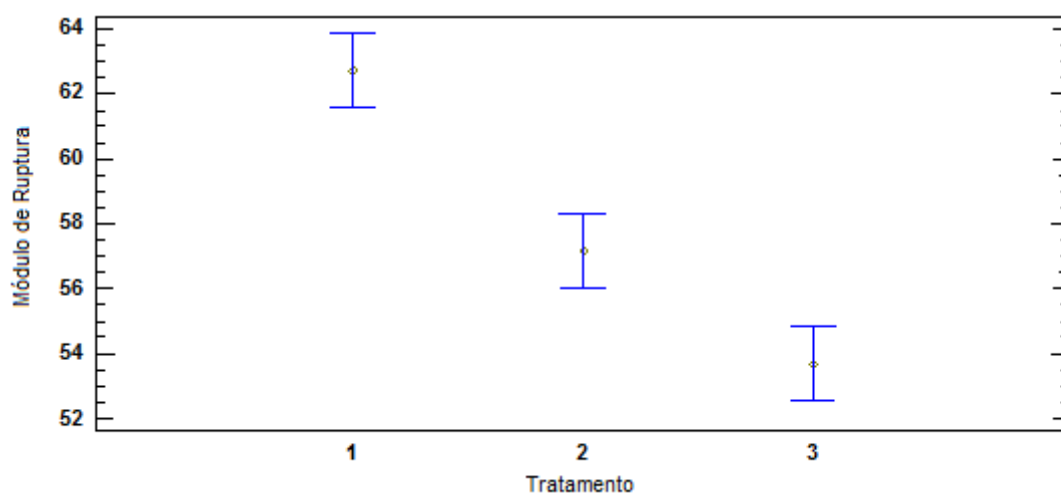


FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA POR TRATAMENTO 1) CONTROLE 2) H1 3) H2

Segundo a TABELA 1 o coeficiente de variação para ensaios de compressão paralela às fibras em madeira livre de defeitos é de 18%, chegando a ser maior do que o encontrado para o grupo controle no presente trabalho, mostrando-se um resultando significativo.

5.2.4 DUREZA BRINELL

A TABELA 11 apresenta os resultados obtidos para a dureza Brinell (HB) da superfície da madeira para o grupo de controle, H1 e H2.

O gráfico da FIGURA 24 abaixo retrata a dureza Brinell para o grupo de controle, H1 e H2 além da variância dos dados. É possível observar no gráfico que o grupo controle apresentou a maior resistência à penetração da esfera metálica na superfície do corpo de prova (face radial), quando comparado aos tratamentos térmicos. O grupo H1 apresentou média menor do que o grupo H2, porém a variância dos dados determina pelo teste de homogeneidade dos grupos, que não há diferenças significativamente estatísticas entre si.

TABELA 11 - DUREZA BRINELL OBTIDO NO ENSAIO DE DUREZA BRINELL POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

Tratamento		HB (N/mm ²)
Controle	Média	20,5158 ^A
	(desvio padrão)	(5,16672)
	(coef. de variação %)	(25,1842%)
H1	Média	17,7196 ^A
	(desvio padrão)	(5,71169)
	(coef. de variação %)	(32,2337%)
H2	Média	18,9754 ^A
	(desvio padrão)	(6,71463)
	(coef. de variação %)	(35,386%)
ANOVA F-ratio		1,47

RAUTKARI, L (et al 2013) relatou para *Pinus sylvestris* L. comportamento similar ao observado no presente trabalho, analisando para a dureza Brinell pela norma DIN 1534 queda da dureza para o tratamento térmico de 120°C e aumento da mesma propriedade para a mesma madeira quando o tratamento térmico foi com temperatura de 150°C.

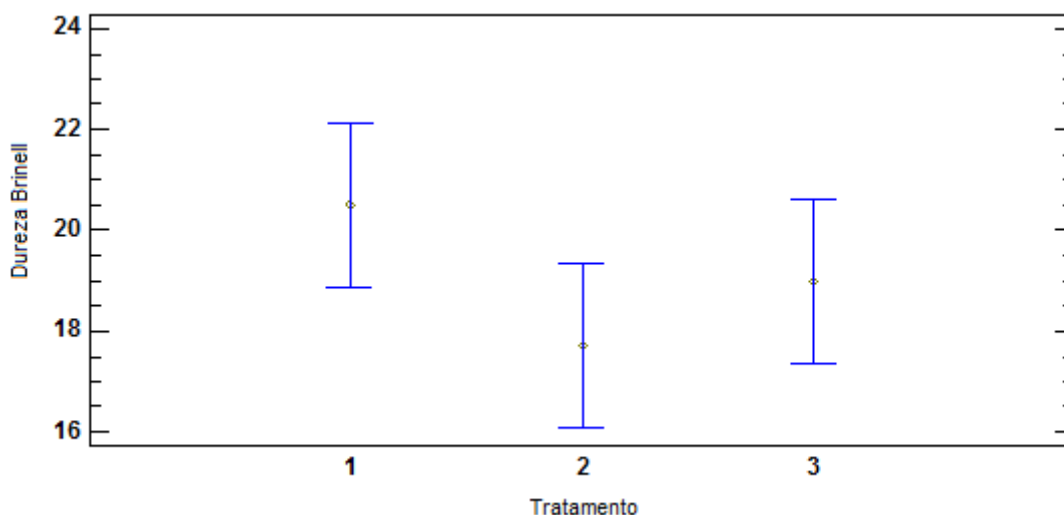


FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E SUA VARIÂNCIA PARA DUREZA BRINELL POR GRUPO

A dureza Brinell é muito discutida, pois seu valor pode flutuar para ensaios em madeira, de acordo com o local onde a esfera é inserida, devido a

não homogeneidade da madeira. Tal característica pode alterar e desvalorizar os resultados obtidos neste procedimento, informando valores errôneos.

A TABELA 1 apresentou para o coeficiente de variação da dureza da madeira valor de 20% e no presente trabalho foi determinado um maior coeficiente de variação, porém não foi informada pelo USDA a normatização utilizada no ensaio. Contudo o ensaio de dureza é problemático, pois se tratando de madeira, um material não homogêneo, a esfera pode ser aleatoriamente forçada contra um anel de crescimento (lenho tardio) que poderia mascarar a dureza real da espécie em questão.

5.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DA MADEIRA

5.3.1 COLORIMETRIA

A partir das medições com o Croma-Meter CR, foi possível encontrar as variáveis L^* (claridade), a^* e b^* (coordenadas cromáticas), C^* (saturação) e h^* (ângulo de tinta), que juntos definem a localização da coloração da madeira nos eixos coordenados x,y e z das cores.

É possível observar a olho nu na FIGURA 25 o escurecimento provocado pelos tratamentos térmicos em comparação com a amostra de controle. A TABELA 12 mostra o valor da variável L^* (claridade) e um resumo da análise de variância ANOVA.

É possível observar uma queda do valor de L^* , indica que a madeira perdeu claridade, ou seja, passou a ficar mais escura, aproximando-se do 0, seguindo a tendência publicada por TODOROVIC *et al* (2012) que ao analisarem as mudanças na coloração da madeira de *Fagus sylvatica* modificada termicamente (Temp.: 170°, 190°C e 210°) também concluíram que os valores de L^* foram diminuindo a medida que a temperatura dos tratamento aumentou, deixando a madeira visivelmente mais escura.



FIGURA 25 - AMOSTRAS DO CONTROLE, TRATAMENTO H1 E TRATAMENTO H2

TABELA 12 - VARIÁVEL L* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	L* (claridade)
Controle	Média	68,6776 ^A
	(desvio padrão)	(5,07322)
	(coef. de variação %)	(7,387%)
H1	Média	59,3921 ^B
	(desvio padrão)	(6,85941)
	(coef. de variação %)	(11,5494%)
H2	Média	40,8332 ^C
	(desvio padrão)	(6,487)
	(coef. de variação %)	(15,8866%)
ANOVA F-ratio		441,79

Segundo teste estatístico de Tukey com 5% de probabilidade de erros há indicação de que houve alterações significativas entre as amostras testadas indicadas pelas letras A, B e C ao lado da média para cada grupo de amostras. A TABELA 13 mostra o valor da variável a* (eixo cromático verde azul) e um resumo da análise de variância ANOVA.

TABELA 13 - VARIÁVEL a^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

Tratamento		a^* (verde/vermelho)
Controle	Média	10,2364 ^A
	(desvio padrão)	(1,51364)
	(coef. de variação %)	(14,7869%)
H1	Média	9,6687 ^B
	(desvio padrão)	(0,998848)
	(coef. de variação %)	(10,3307%)
H2	Média	8,6213 ^C
	(desvio padrão)	(0,71444)
	(coef. de variação %)	(8,28692%)
ANOVA F-ratio		41,52

É possível visualizar que os tratamentos térmicos influenciaram a aproximação da cor da madeira no sentido verde do eixo vermelho-verde. O mesmo fato foi observado por ESTEVES *et al* (2007) no tratamento de *Eucalyptus globulus* (Temp.: 170°C, 180°C, 190°C e 200°C), onde houve diminuição do valor do parâmetro a^* conforme o aumento da temperatura de tratamento. A TABELA 14 mostra do valor da variável b^* (eixo cromático azul amarelo) e o resumo da análise estatística.

TABELA 14 - VARIÁVEL b^* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

Tratamento		b^* (azul/amarelo)
Controle	Média	21,58 ^A
	(desvio padrão)	(1,91635)
	(coef. de variação %)	(8,88023%)
H1	Média	20,0822 ^B
	(desvio padrão)	(1,33125)
	(coef. de variação %)	(6,62903%)
H2	Média	17,0077 ^C
	(desvio padrão)	(3,71853)
	(coef. de variação %)	(21,8639%)
ANOVA F-ratio		71,32

É possível observar que a madeira do grupo controle se distanciou das amostras tratadas termicamente permanecendo na região amarela e não como o grupo H1 e H2 que se aproximou da região azul. Esse fenômeno também foi observado por ESTEVES *et al* (2007). Segundo teste estatístico de Tukey com 5% de probabilidade de erros indica que houve alterações significativas entre as amostras testadas.

A TABELA 15 mostra o valor da variável h (ângulo de tinta) e o resumo da análise estatística. O ângulo de tinta h* apresentou um leve decréscimo de seu valor e este parâmetro que também analisado por GRIEBELER (2013) para *Eucalyptus grandis*, como no atual trabalho, oscila entre tratamentos térmicos e tempos de aplicação das altas temperaturas não sendo objetivo para a conclusão da alteração do ângulo de tinta a partir do tratamento térmico da madeira.

Segundo o teste estatístico de Tukey com 5% de probabilidade de erros indica que houve alterações significativas entre as amostras tratadas termicamente quando comparadas ao grupo controle, porém não quando comparadas entre si.

TABELA 15 - VARIÁVEL h* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	h* (ângulo de tinta)
Controle	Média	64,8751 ^A
	(desvio padrão)	(2,86538)
	(coef. de variação %)	(4,41677%)
H1	Média	64,3884 ^A
	(desvio padrão)	(2,80891)
	(coef. de variação %)	(4,36245%)
H2	Média	62,3521 ^B
	(desvio padrão)	(4,07915)
	(coef. de variação %)	(6,54213%)
	ANOVA F-ratio	13,50

A TABELA 16 mostra o valor da variável c (saturação) e o resumo da análise estatística.

TABELA 16 - VARIÁVEL C* DO EIXO CROMÁTICO OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO POR GRUPO DE AMOSTRAS E RESUMO ESTATÍSTICO

	Tratamento	C* (saturação)
Controle	Média	23,8707 ^A
	(desvio padrão)	(2,21901)
	(coef. de variação %)	(9,29596%)
H1	Média	22,2984 ^B
	(desvio padrão)	(1,29679)
	(coef. de variação %)	(5,81563%)
H2	Média	19,0096 ^C
	(desvio padrão)	(3,64943)
	(coef. de variação %)	(19,1978%)
ANOVA F-ratio		77,60

É possível visualizar um decréscimo no valor da saturação C para os tratamentos térmicos H1 e H2, também relatado por FAN *et al* (2010) que após tratar a madeira por 24h (Temp.: 120°C) observaram a diminuição da saturação das cores das amostras. O teste de Tukey indicou que houve alterações significativas entre os grupos de amostras.

A colorimetria foi realizada em três superfícies distintas. Não foram realizadas análises estatísticas com os valores encontrados para L*, a*, b*, c* e h* para esse caso, porém com a TABELA 17 de médias é possível observar que a variável L indica que a superfície interna é mais escura que a superfície sem tratamento, já as outras variáveis apresentam pouca diferença entre si.

Os valores de ΔE para o grupo de amostras do tratamento térmico H1 foi de 10,075 e para o grupo de amostras H2 foi de 27,644. Observa-se que a diferença de coloração entre a madeira do grupo de controle e as amostras de madeira tratada termicamente foi diretamente proporcional a temperatura do tratamento. Isso significa que a diferença da coloração entre o grupo de controle em comparação ao grupo H2 foi maior do que quando comparado com o grupo H1. Fato também observado por CADEMARTORI (2012) durante o

tratamento de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* a temperaturas entre 180°C e 240°C.

TABELA 17 - MÉDIA DOS VALORES DE L*, A*, B*, C* E H* OBTIDO PELO ENSAIO COLORIMÉTRICO PARA TRÊS SUPERFÍCIES COM TRATAMENTO DISTINTO POR GRUPO DE AMOSTRAS (1: SUPERFÍCIE BRUTA, 2: SUPERFÍCIE LIXADA, 3: SUPERFÍCIE INTERNA)

Tratamento		L*	a*	b*	C*	h*
Controle	1	64,65115	10,43654	23,15269	25,42884	0,420598
	2	69,20026	9,997179	21,56692	23,80169	0,431493
	3	71,92	10,02769	20,02692	22,41615	0,462585
H1	1	52,57846	9,450769	20,90885	22,96155	0,4247
	2	61,70269	9,509231	19,81769	21,99654	0,446965
	3	63,895	9,932692	19,52	21,93717	0,471067
H2	1	33,8	7,948077	12,94808	15,20829	0,557185
	2	43,40538	8,998077	18,16923	20,29471	0,464768
	3	45,29423	8,831923	19,60654	21,52575	0,427345

6 CONCLUSÃO

Os efeitos provocados pelo tratamento térmico na madeira de *Eucalyptus grandis* causaram modificação química e na estrutura de suas substâncias, reduzindo a resistência mecânica da madeira que pode ser comprovada através dos resultados obtidos nos ensaios.

A redução é mais pronunciada no tratamento térmico a 200°C. Os ensaios de flexão dinâmica e compressão axial apresentaram reduções significativas em comparação ao grupo controle. Sendo assim, a madeira modificada para aplicação em fins construtivos, apesar da relativa redução das suas propriedades mecânicas, deve considerar se as reduções são aceitáveis pelas normatizações existentes.

A redução das propriedades de flexão estática e dureza da madeira foram menores em comparação aos outros ensaios, não descartando o uso deste novo material para utilização como pisos por exemplo.

A higroscopicidade da madeira foi reduzida através dos tratamentos térmicos o que, por consequência, melhorou a estabilidade dimensional das peças, sendo mais efetivo para o tratamento a 200°C. As amostras dos dois grupos de tratamento apresentaram comportamento hidrófobo perante água.

A madeira tratada termicamente, como esperado, apresentou redução de massa provocada pela degradação térmica e saída de água.

Em comparação com o controle, a madeira modificada termicamente obteve coloração escura como grande distinção à madeira original e entre os grupos de tratamento, sendo altamente pronunciado para o tratamento a 200°C.

Esse material pode ser indicado para vários fins como revestimentos de fachadas decorativas para casas, prédios e construções empresariais, pois sua anisotropia é severamente reduzida e a coloração escurecida é um apelo visual desejado em projetos decorativos.

Proporciona um ótimo isolamento acústico e térmico, ainda melhor do que o já observado para a madeira seca, sem tratamento a altas temperaturas. A madeira modificada termicamente é também indicada para construção de decks e pisos, pois não apresenta problemas relacionados à alta anisotropia comum a madeira e também pela redução da sua higroscopicidade, fatores que influenciam sua melhor durabilidade quando em contato com solo por exemplo.

A madeira tratada termicamente não será no fim do seu ciclo de vida um produto tóxico e pode substituir madeiras tratadas quimicamente, por também elevar sua resistência natural.

7 REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário estatístico 2013 da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Anuário estatístico. Brasília, 2013.

BATISTA, C. D. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro vap HolzSysteme®**. Universidade Federal do Paraná. Tese de Doutorado. Curitiba, 2012.

BELLON, K. R. da R. **Qualidade da madeira das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis* e *Tectona grandis* modificadas termicamente**. Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2013.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO, G.; PESSOA, A. M. das C.; SILVA, P. H. M. **Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação**. Universidade Federal de Lavras. CERNE, vol. 12, núm. 2, abril-junho, 2006, pp. 182-188.

BRITO, J. O.; MOURA, L. F. **Efeito da termorreificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Scientia Florestalis, vol. 39, núm. 89, março, Piracicaba, 2011.

CADEMARTORI, P. H. G. **Propriedades tecnológicas da madeira termorreificada de três espécies de *Eucalyptus***. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2012.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2009.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ J. C. **A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira.** Brasil Florestal, n. 71, p. 30-41, 2001.

DURBAK, I.; GREEN, D. W.; HIGHLEY, T. L.; HOWARD, J. L.; MCKEEVER, D. B.; MILLER, R. B.; PETTERSEN, R. C.; ROWELL, R. M.; SIMPSON, W. T.; SKOG, K. E.; WHITE, R. H.; WINANDY, J. E.; ZERBE, J. I. **Wood: Encyclopedia of Chemical Technology.** USDA Forest Service. 4ª Edição, vol. 25, 1998, pp. 637-664.

EMBRAPA, DINIZ, F. **Genoma do eucalipto: primeiro sequenciamento vegetal completo liderado pelo Brasil.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1818505/genoma-do-eucalipto-primeiro-sequenciamento-vegetal-completo-liderado-pelo-brasil>. Acesso em 11/2014.

ESTEVES, B.; MARQUES, A. V.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. **Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood.** Wood Sci Technoll, vol. 42, pp. 269-384. 2007.

FAN, Y.; GAO, J.; CHEN, Y. **Colour responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to solvent extraction and heat treatment.** Wood Sci Technoll, vol. 44, pp. 667-678. 2010.

FUENTES-TALAVERA, F. J. **Propiedades térmicas de la madera.** Física de la Madera – Notas de Aula. Maestría en Ciencia de Productos Forestales. Universidad de Guadalajara. 2002.

USDA. **Wood handbook—Wood as an engineering material.** General Technical Report Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

GRIEBELER, C. G. de O. **Colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden modificada termicamente.** Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2013.

IBA, Indústria Brasileira de Árvores. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2013.** Brasília, 2014. Disponível em: http://www.bracelpa.org.br/shared/iba_2014_pt.pdf. Acesso em: 11/2014.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. **Durability of heat-treated wood.** Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, v.60, n.1, p.1-6, 2002.

KLITZKE, R. J. **Curso de Secagem da Madeira.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; DORÉ, G.; YOUNSI, R. **Effect of heat treatment on the wettability of White ash and soft maple by water.** HOLZ ROH WERKST, vol. 66, 2008, pp 355-361.

LOPES, J. O. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretificada de *Tectona grandis* L. f.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2012.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*.** Universidade Federal de Santa Maria. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2010.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

PAINÉL FLORESTAL. **O Potencial produtivo do eucalipto**. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/acom/clipping/arquivos/06-12-2011%20O%20potencial%20produtivo%20do%20eucalipto%20Painel%20Florestal_PF.pdf. Acesso em: 11/2014.

POUBEL, D. S.; GARCIA R. A.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L.; ABREU, H. dos S. **Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea***. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. CERNE, vol. 19, núm. 3, julho-setembro, 2013, pp. 391-398.

RAUTKARI, L.; HONKANEN, J.; HILL, C. A. S.; ELLIS, D. E.; HUGHES, M. **Mechanical and physical properties of thermally modified Scots pine wood in high pressure reactor under saturated steam at 120, 150 and 180 °C**. Eur. J. Wood Prod, vol. 72, pp. 33-41. Berlin, 2013.

SCHMIDT, G. **Ethiopian highland bamboo (*Yushania alpina* K. Schum. W. C. Lin.) as raw material for industrial panel production**. University of Hamburg. Dissertação de Mestrado. Hamburgo, 2013.

TODOROVIĆ, N.; POPOVIĆ, Z.; MILIĆ, G.; POPADIĆ, R. **Estimation of heat-treated beechwood properties by color change**. Bio Resources, vol. 7, núm. 1. 2012. pp. 799-815.